EBU

OPERATING EUROVISION AND EURORADIO

TECH 3355

METHOD FOR THE ASSESSMENT OF THE COLORIMETRIC PROPERTIES OF LUMINAIRES

THE TELEVISION LIGHTING CONSISTENCY INDEX (TLCI-2012) AND THE TELEVISION LUMINAIRE MATCHING FACTOR (TLMF-2013)

Source: FTV-LED

Geneva
June 2014

EBU

OPERATING EUROVISION AND EURORADIO

TECH 3355

METHOD FOR THE ASSESSMENT OF THE COLORIMETRIC PROPERTIES OF LUMINAIRES

THE TELEVISION LIGHTING CONSISTENCY INDEX (TLCI-2012) AND THE TELEVISION LUMINAIRE MATCHING FACTOR (TLMF-2013)

Внимание!

Данный перевод **НЕ** является официальной версией статьи и может содержать отдельные неточности.
Оригинал документа на сайте https://tech.ebu.ch

МЕТОД ОЦЕНКИ КОЛОРИМЕТРИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ

ИНДЕКС СОВМЕСТИМОСТИ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ОСВЕЩЕНИЯ (TLCI-2012) И КОЭФФИЦИЕНТ СОГЛАСОВАНИЯ ТЕЛЕВИЗИОННОГО ОСВЕТИТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ (TLMF-2013)

Источник: FTV-LED

Женева
Июнь 2014

Содержание

Введение 3

1. Принцип индекса согласования телевизионного освещения (TLCI) и коэффициента согласования телевизионного осветительного оборудования (TLMF-2013) 3

1.1 Эталонное оборудование (только TLCI) 4

1.1.1 Вычисление коррелированной цветовой температуры 4
1.1.2 Получение распределения мощности эталонного оборудования (только TLCI) 5

1.2 Тестовые образцы 7

1.3 Камера 7

1.3.1 Кривые чувствительности 7
1.3.2 Линейная матрица, *M*..... 8
1.3.3 Характеристика оптоэлектронной передачи (гамма-коррекция) 9

1.4 Дисплей 9

1.4.1 Характеристика электрооптической передачи (гамма) 9
1.4.2 Основные цвета дисплея 9

1.5 Расчёт цветоразности 10

1.5.1 Получение значения *Q*, TLCI-2012 и TLMF-2013 12
1.5.1 Смысл значения *Q*, TLCI-2012 и TLMF-2013 13

2. Презентация результатов 14

2.1 Расчёт таблицы рекомендаций для колористов 15

3. Библиография 16

Приложение 1: Таблица сравнения цветовых характеристик CIE 1931, 2º observer … 17

Приложение 2: Цветность излучателей на кривой Планка и дневного света 19

Приложение 3: Векторы излучения дневного света 22

Приложение 4: Коэффициенты отражения ColorChecker® 24

Приложение 5: Кривые стандартных камер EBU – 2012..... 31

Метод оценки колориметрических показателей осветительного оборудования,

Индекс совместимости телевизионного освещения (TLCI-2012) и Коэффициент согласования телевизионного осветительного оборудования (TLMF-2013)

Комитет EBU	*Первый выпуск*	*Переработка*	*Переиздание*
TC	2012	2014	

Ключевые слова: Освещение, Колориметрическая характеристика

Введение

Настоящий документ описывает методику оценки колориметрического качества освещения в телевизионном производстве.

Метод предназначен для модернизации индекса цветопередачи (CRI) при использовании в телевизионном производстве. CRI никогда не предназначался для телевидения; он имел ограничения, делающие его непригодным для телевидения.

1. Принцип индекса совместимости телевизионного освещения (TLCI) и коэффициента согласования телевизионного осветительного оборудования (TLMF-2013)

Вместо непосредственной оценки работоспособности осветительного оборудования, как в индексе цветопередачи, TLCI и TLMF имитируют телекамеру и дисплей, используя лишь те параметры камер и дисплеев, которые влияют на цветовую характеристику.

Это реализовано на практике через программное обеспечение, а не реальное телеоборудование. Единственное необходимое оборудование – это спектрорадиометр для измерения распределения спектральной мощности тестируемого осветительного оборудования и компьютер, в котором работает программа анализа выполненных расчётов.

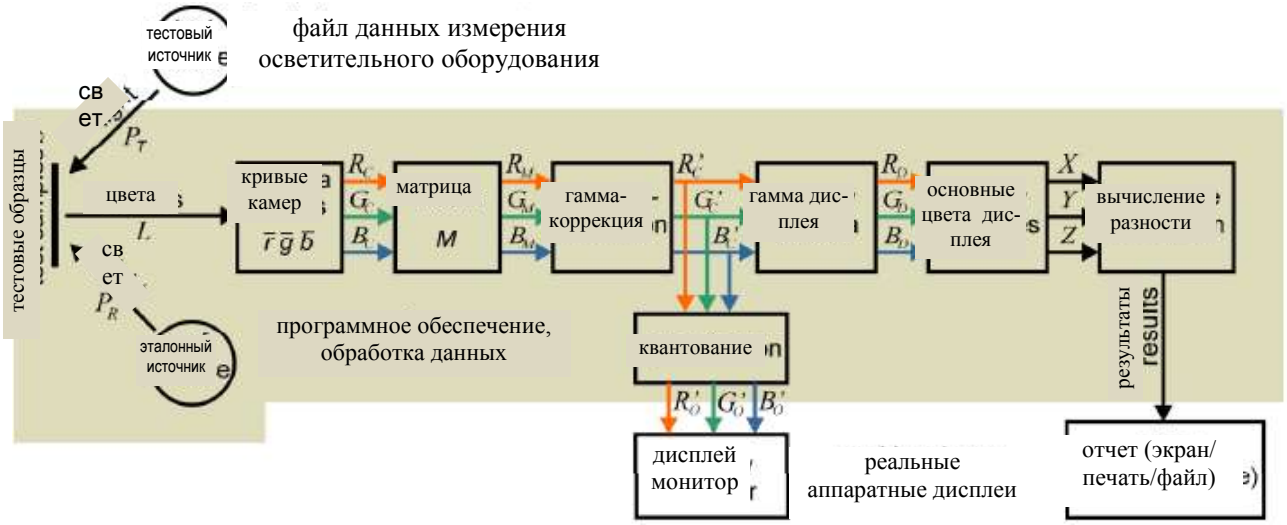

Рис. 1: Схема процесса TLCI и TLMF

Определенный математическим путем комплект цветных образцов освещается либо тестируемым, либо эталонным оборудованием. Воображаемая камера создаёт линейные сигналы R_C G_C B_C,, которые затем обрабатываются традиционной матрицей 3x3 и гамма-корректором для компенсации нелинейного характера стандартного дисплея. Дисплей имеет стандартную электрооптическую гамма-функцию и определенные основные цвета. Выход дисплея анализируется путем стандартных колориметрических процессов для измерения разностей между характеристиками тестируемого и эталонного приборов для каждого цветового образца, прежде чем выдать единое результирующее значение *(Q)* по всем тестовым образцам.

На выходе воображаемой камеры присутствуют нелинейные сигналы R_C' G_C' B_C', которые могут отображаться на реальном дисплее (компьютерном или телевизионном). Если этот сигнал подается на стандартный телевизионный дисплей, то фактические характеристики осветительного прибора можно увидеть напрямую. Обратите внимание, что здесь нет кодирования для трансляции, т.к. оно не должно влиять на цветовоспроизведение. Ни один сигнал не квантуется, кроме как для мониторинга, вся мате-

матика должна выполняться в арифметике плавающей точки, и никакие значения не должны без надобности искажаться или округляться[1].

1.1 Эталонное оборудование

Эталонное оборудование – цветность которого находится в локусе Планка или дневного света и которое имеет цветовую температуру, являющуюся коррелированной цветовой температурой (CCT) тестируемого прибора. Это значительно упрощает вычисления, т.к. форсирует выбор эталонного прибора, распределение спектральной мощности которого можно вычислить путем уже стандартизированных процедур.

1.1.1 Вычисление коррелированной цветовой температуры

После измерения распределения спектральной мощности тестируемого оборудования ($P_{T,\lambda}$), необходимо найти координаты цветности. Это стандартное колориметрическое вычисление. $P_{T,\lambda}$ должно сочетаться с функциями согласования цветов стандартного зрителя CIE 1931 $\overline{x_\lambda}$, $\overline{y_\lambda}$ и $\overline{z_\lambda}$, эти функции сведены в таблицу в Приложении 1. Результат сочетания интегрирован во всем диапазоне видимых волн для создания параметров 3-х основных цветов *(X, Y, Z)*, то есть:

$$X_T = \sum_{\lambda=380}^{760} P_{T,\lambda}\overline{x_\lambda}\ ,\ Y_T = \sum_{\lambda=380}^{760} P_{T,\lambda}\overline{y_\lambda} \quad \text{и} \quad Z_T = \sum_{\lambda=380}^{760} P_{T,\lambda}\overline{z_\lambda} \qquad [1]$$

… хотя суммирование в идеале должно быть непрерывной интеграцией, но при условии, что значения данных берутся с интервалами не более 5 нм, эта альтернатива абсолютна приемлема. Затем выводятся координаты цветности CIE 1931:

$$x = X/(X+Y+Z),\ \ y = Y/(X+Y+Z) \quad \text{и} \quad z = Z/(X+Y+Z) \qquad [2]$$

хотя z не нужен, т.к. $x + y + z = 1$. Но координаты цветности необходимы в значениях CIE 1960:

$$u = 2x/(6y - x + 1.5) \quad \text{и} \quad v = 3y/(6y - x + 1.5) \qquad [3]$$

Теперь CCT установлена. Формально она определяется как цветовая температура в локусе Планка (локусе цветностей излучателей черного тела при различных температурах), выраженная в значениях CIE 1960, которая наиболее точно совпадает с тестируемым цветом. Математически это можно вывести путем вычисления цвета в локусе, ближайшем в значениях цветности.

Хотя для этого есть простой способ, с помощью “уравнения McCamy”, но он недостаточно точен для наших целей.

Для упрощения масштаба вычисления используйте предварительно рассчитанные значения для кривой Планка области и области излучения дневного света. Такие данные содержатся в таблице в Приложении 2 с близкими интервалами и высокой точностью. Процесс расчета простой – сканирование значений данных и вычисление угла от цветности тестового цвета до локуса для нахождения цветовой температуры, при которой угол будет точно ±90°.

Для этого данные сканируются до тех пор, пока величина углов от тестового цвета до двух соседних точек в геометрическом месте не будет менее 90°, а затем вычисляется обычное произведение с помощью тригонометрии.

[1] TLCI был предложен и разработан W.N. Sproson и E.W. Taylor из BBC Research Department, с 1971 по 1988 г. Нынешний TLCI-2012 – логическое расширение и модернизация этой работы, с дополнением и обновлением, ставшее темой документа на IBC 2011 и 2012.

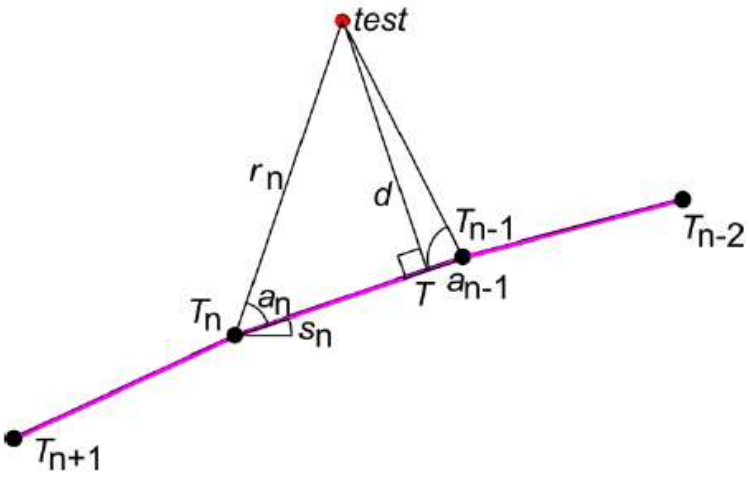

Рис. 2: Расчет CCT

В каждой точке, n, вычисляется наклон локуса:

$$s_n = tan^{-1}\left(\frac{v_{n-1}-v_n}{u_{n-1}-u_n}\right) \quad [4]$$

… и расстояние, *r*n, между тестовым цветом и точкой данных будет:

$$r_n = \sqrt{(u_{test}-u_n)^2+(v_{test}-y_n)^2} \quad [5]$$

…затем вычисляется угол между тестовым цветом и горизонтальной плоскостью:

$$a = tan^{-1}\left(\frac{v_{test}-v_n}{u_{test}-u_n}\right) \quad [6]$$

… из которого угол между тестовым цветом и линией CCT будет:

$$a_n = a - s_n \quad [7]$$

Следует соблюдать осторожность, чтобы все углы находились между 0° и 360°. Согласование определяется как пара точек данных, для которых углы a_n и a_{n-1} (по величине) меньше 90°. В каждой точке угол a_{n-1} получается из расчета для предыдущей точки путем вычитания ее из 180°. Однако этот угол a_{n-1} для дальнейших вычислений не нужен, он используется только в поиске ближайшей пары точек данных.

Если тестовый цвет находится с другой стороны локуса, то оба внутренних угла будут отрицательными.

CCT и координаты цветности находятся по тригонометрии. Поскольку расстояние между T_n и T_{n-1}:

$$r_n cos(d/r_n) \quad [8]$$

… то расстояние d_n будет:

$$d_{uv} = r_n sin(a_n)/0.0054 \quad [9]$$

… или:

$$d_{uv} = \sqrt{(u_{test}-u_T)^2+(v_{test}-v_T)^2} \quad [10]$$

Расстояние *d* – индикатор качества цветового согласования; обычно предполагается, что значение 0.0054 – «едва заметная разница» и что это практический лимит жизнеспособности CCT, поэтому *d* нормализовано до этого значения.

Если тестовый цвет находится на зеленой стороне локуса, знак *d* меняется на противоположный. Это легко установить, т.к. u_T должно быть меньше u_L.

1.1.2 Получение распределения мощности эталонного оборудования (только TLCI)

Если CCT меньше 3400K, предполагается планковский излучатель.

Если CCT больше 5000K, предполагается излучатель дневного света.

Если ССТ между 3400K и 5000K, предполагается смешанный источник света, являющийся линейной интерполяцией между планковским светом 3400K и дневным 5000K.

Следовательно, необходимо вычислить распределение спектральной мощности и для планковского, и для дневного излучателей. Математика для обеих операций определена в CIE Tech 15:2004.

1.1.2.1 Планковское излучение

Это можно вычислить непосредственно из упрощенной версии Закона излучения Планка:

$$P_\lambda = 100\left(\frac{560}{\lambda}\right)^5 \frac{\exp\left(\frac{1.435\times10^7}{560T}\right)-1}{\exp\left(\frac{1.435\times10^7}{\lambda T}\right)-1} \qquad [11]$$

…где λ – длина полны в нанометрах (нм), а T – требуемая цветовая температура в кельвинах. Значения будут нормализованы так, чтобы значение при 560 нм было 100.

1.1.2.2 Излучение дневного света

Это вычисляется косвенно с помощью значений, указанных в Приложении 3. Формула дана в CIE Tech 15.2004.

Сначала вычислим координаты цветности CIE 1931 для коррелированной цветовой температуры T:

$$\text{Для } T < 7000K,\ x_D = -4.6070\left(\frac{10^3}{T}\right)^3 + 2.9678\left(\frac{10^3}{T}\right)^2 + 0.09911\left(\frac{10^3}{T}\right) + 0.244063 \qquad [12]$$

$$\text{Для } T \geq 7000K,\ x_D = -2.0064\left(\frac{10^3}{T}\right)^3 + 1.9018\left(\frac{10^3}{T}\right)^2 + 0.24748\left(\frac{10^3}{T}\right) + 0.237040 \qquad [13]$$

$$y_D = -3.000{x_D}^2 + 2.870x_D - 0.275 \qquad [14]$$

Затем вычисляется распределение спектральной мощности:

$$D_\lambda = S_{0\lambda} + M_1 S_{1\lambda} + M_2 S_{2\lambda} \qquad [15]$$

Где S_0, S_1 и S_2 – табличные значения распределения спектральной мощности, представляющие основные компоненты солнечного света, определенные в CIE Tech 15:2004 Приложении C и представленные здесь в Приложении 3. Значения M_1 и M_2 выводятся из координат цветности:

$$M_1 = \frac{-1.77861x_D + 5.90757y_D - 1.34674}{0.25539x_D - 0.73217y_D + 0.02387} \text{ и } M_2 = \frac{-31.44464x_D + 30.06400y_D + 0.03638}{0.25539x_D - 0.73217y_D + 0.02387} \qquad [16]$$

Обратите внимание, что если эта кривая распределения спектральной мощности нормально обрабатывается для получения координат цветности, они могут не точно совпадать с исходными значениями цветности. Это нормально, и поэтому значения здесь представлены в таблице (Приложение 3) из вычислений распределения спектральной мощности.

1.1.2.3 Смешанное излучение

Когда тестируемый прибор имеет ССТ между 3400K и 5000K, нужен смешанный эталонный прибор. Это интерполируется из распределения планковского света 3400K и распределением дневного света 5000K:

$$M_\lambda = \frac{D_{5000,\lambda}(T-3400) + P_{3400,\lambda}(5000-T)}{5000-3400} \qquad [17]$$

Где $D_{5000,\lambda}$ и $P_{3400,\lambda}$ – значения дневного и планковского света, возвращенные из вычислений 5000K и 3400K соответственно.

В этих условиях значение d, расстояние цветности тестируемого прибора от его ССТ, нужно изменить, т.к. области планковского и дневного света не объединяются, а идут почти параллельно, но разделенные расстоянием примерно в 0.9 единиц d. Однако, поскольку линия цветности, соединяющая $P_{3400,\lambda}$ и $D_{5000,\lambda}$, почти совпадает с планковской областью до 4000K, расстояние до планковской области может использоваться до 4000K. Между 4000K и 5000K, однако, применяется линейное интерполирование:

$$d + 0.9\frac{5000 - T}{5000 - 4000} \text{ для } d > 0 \text{ т.е. в сторону пурпурного} \qquad [18]$$

$$d - 0.9\frac{T - 4000}{5000 - 4000} \text{ для } d \le 0 \text{ т.е. в сторону зеленого} \qquad [19]$$

1.2 Тестовые образцы

Поскольку анализ изометрический (с использованием спектральных, а не трехкоординатных данных), тестируемый набор должен включать известные коэффициенты отражения (распределение отражения с длиной волны). Также важно, чтобы набор цветов был распознаваем для специалистов телевидения и спецосвещения.

Поэтому была выбрана ColorChecker®, т.к. это доступная физическая испытательная таблица, позволяющая проверять выход алгоритма с реальной камерой и дисплеем. Она также представляет цвета с хорошим распределением оттенков и насыщенности в цветовой гамме телевидения.

Рис. 2: Карта ColorChecker®

Хотя таблица была создана для фотографии, она может использоваться и для тестирования телевизионных камер. Она содержит матрицу из 24 патчей в 4 строках по 6 штук с данными калибровки для каждого цвета.

Один из цветов (голубой, в третьей строке справа) находится вне цветовой гаммы телевидения, когда освещается прибором D65, но это не проблема, как будет показано в Приложении 4. Коэффициенты отражения цветовых патчей взяты из предыдущей работы BBC Research Department для первого TLCI. Таблицы данных коэффициентов отражения приведены в Приложении 4. Для обеспечения согласованности результатов TLCI-2012 следует использовать эти таблицы, а не результаты любых других измерений.

Данные распределения спектральной мощности для каждого прибора, $P_{T,\lambda}$ и $P_{R,\lambda}$, сочетаются с данными коэффициента отражения для каждого образца, S_λ, по очереди, для создания распределения спектральной мощности, L_λ, цвета, который достигает датчиков камеры:

$$L_\lambda = P_\lambda S_\lambda \qquad [20]$$

Где λ – длина волны света в нанометрах (нм). Для всех спектральных данных в математике TLCI-2012 диапазон измеряется от 380 до 760 нм, общепринятый диапазон видимой волны, и шагами по 5 нм.

1.3 Камера

Камера определяется тремя наборами параметров; кривыми чувствительности, линейной матрицей и функцией оптоэлектронной передачи или гамма-коррекцией.

1.3.1 Кривые чувствительности

В исходной работе TLCI Sproson и Taylor использовался ряд кривых, предназначенных для имитации работы трубок Plumbicon®, но для этой версии алгоритма новый набор данных был взят из современных камер HDTV, CCD и CMOS. Хотя технологии сильно изменились с 1971 г., кривые поменялись совсем чуть-чуть, однако для TLCI-2012 был определен новый набор. Таблицы чувствительности даны в Приложении 5. Работа по развитию этих таблиц изложена в EBU Tech 3353.

Таким образом, датчики генерируют следующие сигналы:

$$R_C = \sum_{\lambda=380}^{760} P_\lambda S_\lambda \overline{r_\lambda}, \quad G_C = \sum_{\lambda=380}^{760} P_\lambda S_\lambda \overline{g_\lambda} \quad \text{и} \quad B_C = \sum_{\lambda=380}^{760} P_\lambda S_\lambda \overline{b_\lambda} \qquad [21]$$

Где $\overline{r_\lambda}$, $\overline{g}$ и nd $\overline{b}$- чувствительность датчиков. Строго говоря, сумма должна быть непрерывным а интегралом сочетания, но этот дискретизированный подход более чем адекватен для данной цели.

Для TLCI программное обеспечение должно выполнять операции нормализации и цветового баланса с каждым устройством по очереди (тестируемым и эталонным), так, чтобы $R_C = G_C = B_C = 1$, когда цветовой образец – это нейтральный цвет с равным отражением на всех волнах.

Для TLMF программное обеспечение должно выполнять эту нормализацию и баланс только для эталонного устройства, а для тестового – только нормализацию, чтобы яркостной сигнал камеры был единицей.

Поскольку набор тестовых образцов включает шкалу серого, с белым участком с коэффициентом отражения 90.01%, уровень отражения этого нейтрального цвета устанавливается на 0.9 (90%); это потом заставит белый патч генерировать пиковый белый, что является обычной процедурой экспонирования для телевизионных камер. Это точно имитирует нормальное использование камеры и устраняет потребность в CRI для оценки процесса цветовой адаптации для человеческих глаз.

Обратите внимание, что патчи серой шкалы не должны входить в анализ TLCI-2012, они представлены просто потому, что существуют, и для демонстрации, что баланс белого для каждого устройства по очереди сделан правильно. Однако патчи серой шкалы должны быть включены в вычисления TLMF-2013, т.к. отличия в цветовом балансе весьма заметны.

1.3.2 Линейная матрица, *M*

Поскольку кривые чувствительности камеры могут иметь только положительные значения, а идеальные кривые для совпадения с любым набором основных цветов реальных дисплеев должны иметь отрицательные блоки, необходима матрица. Матрица не может генерировать точное совпадение с теоретически идеальными кривыми для любого набора основных цветов дисплея, но обычно оптимизирована по цветовой характеристике до приемлемой степени. Матрица – сокращенный метод представления набора одновременных уравнений:

$$\begin{bmatrix} R_M \\ G_M \\ B_M \end{bmatrix} = M \bullet \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{R,R} & c_{G,R} & c_{B,R} \\ c_{R,G} & c_{G,G} & c_{B,G} \\ c_{R,B} & c_{G,B} & c_{B,B} \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R_C \\ G_C \\ B_C \end{bmatrix} \qquad [22]$$

то же, что и:

$$R_M = c_{R,R} R_C + c_{G,R} G_C + c_{B,R} B_C \qquad [23]$$

…и так далее. Обратите внимание, что коэффициенты в каждой строке принудительно дают в сумме единицу во избежание изменения цветового баланса, и что обычный способ это гарантировать – определять только перекрестные коэффициенты, взятые из основной диагонали, таким образом:

$$c_{R,R} = 1 - c_{G,R} - c_{B,R}, \quad c_{G,G} = 1 - c_{R,G} - c_{B,G} \quad \text{и d} \quad c_{B,B} = 1 - c_{R,B} - c_{G,B} \qquad [24]$$

Для TLCI-2012 и TLCI-2012 была установлена матрица 3x3, которая оптимизирует характеристику цветовоспроизведения стандартной камеры при использовании со стандартным дисплеем HDTV по параметрам ITU R.BT-709. В данном примере матрица была оптимизирована для наилучшей цветовой характеристики с нелинейностями камеры и дисплея, другая матрица потребуется для линейной системы или, возможно, для системы с другой гамма-коррекцией камеры. Будет одинаковая возможность оптимизации матрицы для использования с любым другим набором основных цветов реальных дисплеев. Значения для терминов матрицы даны в Приложении 5.

Камеры также включает контроль насыщенности, который применяется после матрицы камеры и баланса белого, но до гамма-коррекции. Это предотвращает срезание некоторых цветов при освещении некоторыми приборами. Это работает как вторичная матрица:

$$\begin{bmatrix} R_B \\ G_B \\ B_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1-2a & a & a \\ a & 1-2a & a \\ a & a & 1-2a \end{bmatrix} . \begin{bmatrix} R_M \\ G_M \\ B_B \end{bmatrix} \qquad [25]$$

… где *α* выводится из уровня насыщенности, *S*, в диапазоне от 0 (что означает монохром) до 100:

$$a = (1 - S/100)/3 \qquad [26]$$

Для TLCI-2012 и TLMF-2013 уровень насыщенности должен быть 90%, следовательно, матрица насыщенности должна быть:

$$\begin{bmatrix} R_B \\ G_B \\ B_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9\dot{3} & 0.0\dot{3} & 0.0\dot{3} \\ 0.0\dot{3} & 0.9\dot{3} & 0.0\dot{3} \\ 0.0\dot{3} & 0.0\dot{3} & 0.9\dot{3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} R_M \\ G_M \\ B_M \end{bmatrix} \qquad [27]$$

1.3.3 Характеристика оптоэлектронной передачи (гамма-коррекция)

Для TLCI-2012 и TLMF-2013 имеет смысл лишь одна кривая, из ITU-R BT.709, хотя другие кривые производят субъективно лучшие характеристики цветовоспроизведения, следовательно:

$$R_C{}' = \begin{cases} 4.5R_B, & R_B < 0.018 \\ 1.099R_B^{0.45}, & R_B \geq 0.018 \end{cases} \qquad [28]$$

и аналогично для G_C' и B_C'. Это значения сигналов, которые возбуждают дисплей.

1.4 Дисплей

Дисплей определяется всего двумя наборами параметров, нелинейностью или функцией электрооптической передачи и цветностью набора основных цветов и точки баланса белого.

1.4.1 Характеристика электрооптической передачи (гамма)

Исторически общепринято, что стандартный дисплей следует чистому степенному закону, следовательно:

$$V_D = V_C{}'^{\gamma} \qquad [29]$$

и что γ принимает значения 2.2 для NTSC или 2.8 для PAL. Однако ни одно из этих значений не представляет точно характеристик современных дисплеев, а значение 2.4 было определено ITU. Следовательно, и TLCI-2012, и TLMF-2013 должны использовать значение 2.4:

$$R_D = R_C{}'^{2.4}, \; G_D = G_C{}'^{2.4} \text{ anc и } = B_C{}'^{2.4} \qquad [30]$$

1.4.2 Основные цвета дисплея

Основные цвета дисплея выбраны из цветов ITU-R BT.709 для систем HDTV. Результаты использования основных телевизионных цветов EBU (PAL) дают незначительные отличия, т.к. набор основных цветов BT.709 использует красный и синий из набора EBU, а зеленый лишь немного отличается от зеленого EBU. Поэтому результаты этого вычисления одинаково применимы к HDTV/SDTV.

Таблица 1: Цветность основных цветов ITU-R BT.709

	x	y
Красный	0.64	0.33
Зеленый	0.3	0.6
Синий	0.15	0.06
Баланс белого, D65	0.3127	0.3290

Матрица синтеза дисплея выводится прямо из этих основных цветов и балансного. Это вычисляется с точностью до 15 десятичных разрядов и округляется до 6 разрядов. Это следует применять с такой точностью:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.412391 & 0.357584 & 0.180481 \\ 0.212639 & 0.715169 & 0.072192 \\ 0.019331 & 0.119195 & 0.950532 \end{bmatrix} \bullet \begin{bmatrix} R_D \\ G_D \\ B_D \end{bmatrix} \qquad [31]$$

и именно эти параметры трех основных цветов $X_T\ Y_T\ Z_T$ и $X_R\ Y_R\ Z_R$ для тестируемого и эталонного приборов соответственно, используются для вычисления разности в цветовом оттенке и формулировки значения TLCI-2012 и TLMF-2013.

1.5 Расчёт цветоразности

Для вычисления визуальной величины цветоразности существует шесть алгоритмов. Самый старый, CIE1964, применялся в CRI и в работе TLCI, начатой Sproson и Taylor. Пять следующих алгоритмов лучше тем, что ближе представляют визуальные ощущения.

В течение разработки TLCI-2012 были проведены субъективные тесты для установления, какой из пяти алгоритмов предпочтительней при телевизионном просмотре, и эта работа изложена в EBU Tech 3354. Лучшей системой оказалась последняя, CIEDE2000, которая является результатом постоянных регулировок системы CIELAB.

Вычисления цветоразности предназначены для получения единого числового значения (ΔE^*) для восприятия цветоразности между двумя видами тестируемого образца, при отдельном освещении тестируемым и эталонным прибором. В следующих формулах нижний индекс R относится к характеристике с эталонным прибором, а T – с тестовым, индекс i относится к значению для отдельного цветового образца, а a – к значению для всех образцов вместе взятых. Нижний индекс W относится к белой точке дисплея, *D*65.

Символы в следующем объяснении используются CIE в CIE Tech 15:2004.

- Сначала вычислим значения CIELAB для цветовых образцов с тестируемым и эталонным освещением:

$$L^*_{T,i} = 116 f\left(Y_{T,i}/Y_W\right) - 16 \qquad L^*_{R,i} = 116 f\left(Y_{R,i}/Y_W\right) - 16 \qquad [32]$$

…где *f(var)* – стандартная функция:

$$f(var) = \begin{cases} \frac{1}{3}\left(\frac{116}{24}\right)^2 var + \frac{16}{116}, & var < \left(\frac{24}{116}\right)^3 \\ var^{1/3}, & var \geq \left(\frac{24}{116}\right)^3 \end{cases} \qquad [33]$$

$$a^*_{T,i} = 500\left(f\left(\frac{X_{T,i}}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_{T,i}}{Y_W}\right)\right) \quad \text{и} \quad a^*_{R,i} = 500\left(f\left(\frac{X_{R,i}}{X_W}\right) - f\left(\frac{Y_{R,i}}{Y_W}\right)\right) \qquad [34]$$

$$b^*_{T,i} = 200\left(f\left(\frac{Y_{T,i}}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_{T,i}}{Z_W}\right)\right) \quad \text{и} \quad b^*_{R,i} = 200\left(f\left(\frac{Y_{R,i}}{Y_W}\right) - f\left(\frac{Z_{R,i}}{Z_W}\right)\right) \qquad [35]$$

…и значения $X_W\ Y_W\ Z_W$ – трехкоординатные значения белой точки дисплея.

- Затем вычислим промежуточные значения для манипулирования результатами CIELAB для каждого тестируемого цвета i:

$$C^*_{T,i} = \sqrt{a^{*2}_{T,i} + b^{*2}_{T,i}} \quad \text{и} \quad C^*_{R,i} = \sqrt{a^{*2}_{R,i} + b^{*2}_{R,i}} \qquad [36]$$

$$\overline{C}^*_i = \left(C^*_{T,i} + C^*_{R,i}\right)/2 \qquad [37]$$

$$g_i = \frac{1}{2}\left(1 - \sqrt{\frac{\overline{C}^{*7}_i}{\overline{C}^{*7}_i + 25^7}}\right) \quad [38]$$

$$a'_{T,i} = (1 + g_i)a^*_{T,i} \quad \text{и} \quad a'_{R,i} = (1 + g_i)a^*_{R,i} \quad [39]$$

$$C'_{T,i} = \sqrt{a'^2_{T,i} + b^{*2}_{T,i}} \quad \text{и} \quad C'_{R,i} = \sqrt{a'^2_{R,i} + b^{*2}_{R,i}} \quad [40]$$

$$h_{T,i} = \arctan(b^*_{T,i}/a'_{T,i}) \quad \text{и} \quad h_{R,i} = \arctan(b^*_{R,i}/a'_{R,i}) \quad [41]$$

Примечание: оттенок, h, измеряется в градусах, а не в радианах, и вычисления должны корректно учитывать знаки a^* и b^* для присвоения угла в диапазоне от 0° до 360°.

$$\overline{L}'_i = (L^*_{T,i} + L^*_{R,i})/2 \quad [42]$$

$$\overline{C}'_i = (C'_{T,i} + C'_{R,i})/2 \quad [43]$$

$$\overline{h}_i = (h_{T,i} + h_{R,i})/2 \quad [44]$$

$$\Delta h_i = h_{T,i} - h_{R,i} \quad [45]$$

Примечание: разность оттенка, Δh, измеряется в градусах, а не в радианах, и разность должна быть в диапазоне от -180° до +180°. Если разность выходит за пределы этого диапазона, то 180 нужно отнять от большего из двух углов оттенка и заново вычислить среднее значение и разность.

- Вычислим дальнейшие промежуточные значения для тестируемого цвета.

$$S_{L,i} = 1 + \frac{0.015(\overline{L}'_i - 50)^2}{\sqrt{20 + (\overline{L}'_i - 50)^2}} \quad [46]$$

$$S_{C,i} = 1 + 0.045\overline{C}'_i \quad [47]$$

$$T_i = 1 - 0.17\cos(\overline{h}_i - 30) + 0.24\cos(2\overline{h}_i) + 0.32\cos(3\overline{h}_i + 6) - 0.2\cos(4\overline{h}_i - 63) \quad [48]$$

$$S_{H,i} = 1 + 0.015\overline{C}'_i T_i \quad [49]$$

$$R_{C,i} = 2\sqrt{\frac{\overline{C}^{*7}_i}{\overline{C}^{*7}_i + 25^7}} \quad [50]$$

$$\Delta\theta_i = 30\exp\left(-\left(\frac{\overline{h}'_i - 275}{25}\right)^2\right) \quad [51]$$

$$R_{T,i} = -R_{C,i}\sin(2\Delta\theta_i) \quad [52]$$

$$\Delta L = \frac{\left(L^*_{T,i} - L^*_{R,i}\right)}{k_L S_{L,i}} \quad [53]$$

$$\Delta C = \frac{\left(C'_{T,i} - C'_{R,i}\right)}{k_C S_{C,i}} \quad [54]$$

$$\Delta H_i = \frac{2\sin\left(\frac{h'_{T,i} - h'_{T,i}}{2}\right)\sqrt{C'_{T,i}\,C'_{R,i}}}{k_H S_{H,i}} \quad [55]$$

Где значения k – коэффициенты взвешивания, обычно единица. Они могут меняться для подгонки метрики, влияя на освещенность, цветность и оттенок, соответственно, и могут определяться отдельно для каждого тестируемого цвета на экспериментальной основе. Если они меняются с единицы, то их значения должны входить в название системы, например, CIEDE2000(2:1:1).

Для TLCI-2012 и TLMF-2013все значения k должны быть установлены на единицу.

- А затем вычислим результирующее значение разности:

$$\Delta E^*_i = \sqrt{\Delta L_i^2 + \Delta C_i^2 + \Delta H_i^2 + R_{T,i}\Delta C_i \Delta H_i} \quad [56]$$

1.5.1 Получение значения TLCI-2012 и TLMF-2013, *Q*

И в CRI, и в работе по TLCI Sproson и Taylor использована простая формула для получения конечного значение R_a из среднего значения ΔE^*:

$$R_a = 100 - 4.6\Delta E^*_a \quad [57]$$

…где ΔE^*_a – среднее значение для всех тестируемых цветов. Значение 4.6 было выбрано так, чтобы при оценке «теплой белой» флуоресцентной трубки значение R_a становилось ровно 50. С этим уравнением есть две проблемы:

- Возможны отрицательные значения R_a, если ΔE^*_a превысит 22, что общепризнано очень серьезной ошибкой.
- В оригинальной (CIE Tech 13, 1974) версии CRI берется среднее арифметическое значение отдельных ошибок:

$$\Delta E^*_a = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta E^*_i \quad [58]$$

…что ослабляет эффект плохо воспроизводимых цветов, которые наиболее заметны. В исходной работе по TLCI Sproson и Taylor и в последней спецификации CRI (CIE Tech 13.3) применяются вычисления RMS:

$$\Delta E^*_a = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\Delta E^{*2}_i\right)^{1/2} \quad [59]$$

Для TLCI-2012 используется новая формулировка, устраняющая проблемы в этих вычислениях:

$$Q_a = \frac{100}{1 + \left(\frac{\Delta E^*_a}{k}\right)^p} \quad [60]$$

…где ΔE^*_a – среднее степенное значение ΔE^*_i для отдельных тестовых образцов:

$$\Delta E^*_a = \left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\Delta E^*_i\right)^4\right)^{1/4} \quad [61]$$

Это лучше сохраняет влияние цветов с худшими характеристиками (т.е. с наибольшими значениями ΔE^*). Эффект аналогичен игнорированию всех цветов, результат ΔE^* которых ниже среднего арифметического, и принятию RMS значения остальных, худших, цветов, которые будут наиболее заметны на практике. Обратите внимание, что любой тестируемый цвет, усеченный в математике, с любыми значениями $R\ G\ B$ камеры или дисплея ниже нуля, должен быть исключен из вычислений, т.к. будет срезан в реальной камере и даст ложный цвет.

Для TLCI-2012 используются только первые 18, цветных, тестовых патчей, кроме серой шкалы.

Для TLMF-2013 используются все 24 тестовых патча, т.к. ошибки в балансе белого сильно заметны.

Константа k выбирается так, чтобы Q_a было 50 при оценке флуоресцентной трубки дневного света. Это устройство производит ошибку ΔE^* TLCI-2012 в 3.16, которая является критической величиной для телевизионных колористов, т.к. ошибки больше этого значения трудно полностью откорректировать, но меньшие значения обычно корректируются с разным успехом.

Уровень мощности *p* выбран для более осмысленного распределения значений, чем в формуле R_a

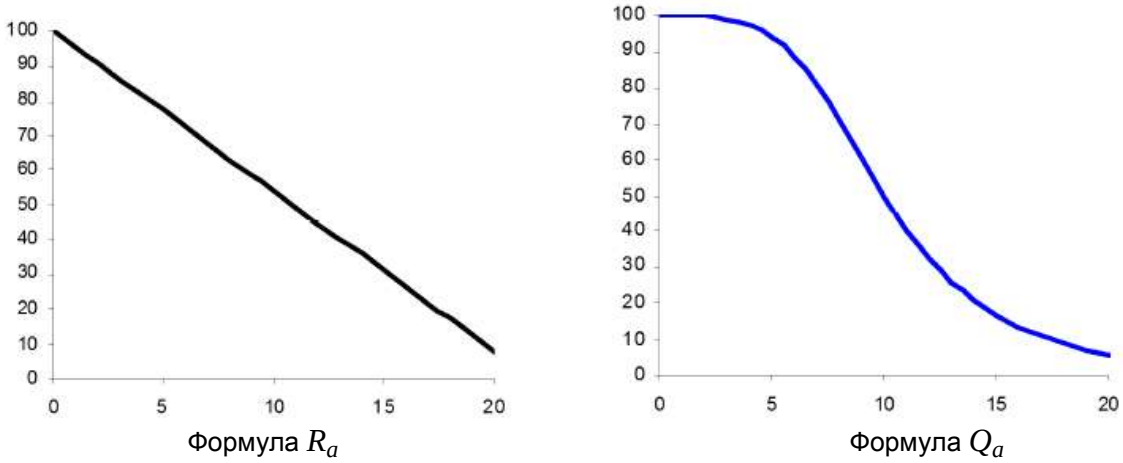

Рис. 3: Значения ΔE^*_a

На Рис. 3 изображены кривые для значений ΔE^*_a от 0 до 20. Новая формула Q_a сжимает эффект мелких ошибок, делая небольшие изменения в Q_a (это верно, т.к. небольшие ошибки не будут заметны и не создадут проблем), расширяя при этом средние значения (где нужны критические решения по пригодности устройства в телевидении). Только для данной иллюстрации k было установлено на 10, чтобы значение Q_a приблизительно совпадало с R_a для того же значения ΔE^* 10.

Для TLCI-2012 и TLMF-2013 k устанавливается на 3.16, а p на 2.4.

1.5.2 Смысл значения *Q*, TLCI-2012 и TLMF-2013

Ни CRI, ни оригинальная работа Sproson и Taylor по TLCI не определяют смысл вычисленного значения R_a или Q_a. Алгоритмы TLCI-2012 и TLMF-2013 более полезны.

Формулировка Q_a была ограничена значением 50 для типичной флуоресцентной трубки дневного света и считается границей между приборами, корректируемыми для телевидения, и некорректируемыми. На основании этого шкала Q_a может маркироваться двумя способами; по 5-балльной шкале качества ITU и по мнениям из небольшого числа субъективных тестов, проведенных пятью профессиональными колористами.

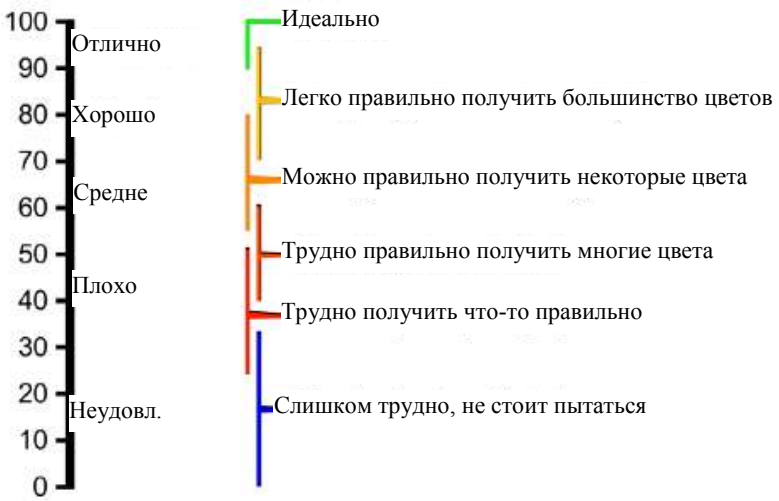

Рис. 4: Объяснение Q_a

Обратите внимание, что эти мнения не формируют жестких определений, и есть значительный перехлест. Это имеет две причины; мнения колористов чуть варьируются и выбранная метрика цветоразности (CIEDE2000) не идеальна.

2. Презентация результатов

Хотя для оценки оборудования необходимо только значение Q_a, полезно дать пользователю больше информации.

Пример для TLCI показан на Рис. 4. Файл тестируемого прибора обозначен вверху слева, а полученное CCT дано вместе с расстоянием от цветности устройства до цветности CCT. Обратите внимание, что это расстояние показывает надежность вычислений; лишь когда это значение ниже 1, результат достоверен (согласно CIE Tech 15:2004). Результирующее значение Q_a выделено красным, а опорный источник, с которым производится сравнение – голубым.

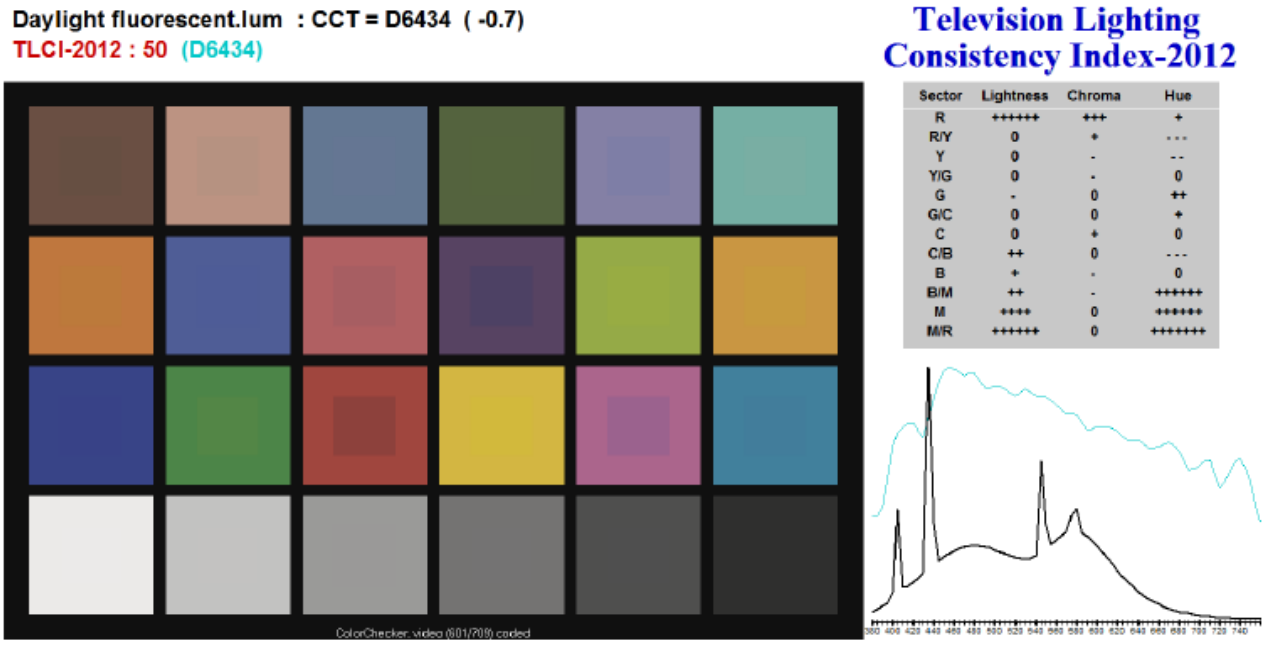

Рис. 5: Пример результата TLCI-2012

Справа вверху находится таблица рекомендаций для колористов. Она разделяет круг оттенков на 12 секторов и дает рекомендации, сколько требуется коррекции и в каком направлении для каждого сектора. Понятно, что “+” означает увеличение, “-” уменьшение, а число символов указывает серьезность коррекции. Для коррекции оттенка “+” означает вращение против часовой стрелки (т.е. от красного к желтому, от зеленого к голубому и т.д.), а “-” – по часовой (т.е. от красного к пурпурному, от зеленого к желтому и т.д.).

Справа внизу обозначены спектральные данные для тестируемого (красным) и эталонного (голубым) приборов. Они масштабированы по размеру экрана.

Главная панель результата – представление тестовой таблицы ColorChecker®. Каждый участок представлен в значениях R_C' G_C' B_C', созданных воображаемой камерой при освещении эталонным прибором, с врезкой характеристики тестируемого прибора. Значения R_C' G_C' B_C' следует квантовать по правилам sRGB для показа на компьютерном дисплее или для печати:

$$R_O' = 255R_C', \quad G_O' = 255G_C \quad \text{и} \quad B_O' = 255B_C' \qquad [62]$$

…так, чтобы черный был на 0, а пиковый сигнал на 255. Если сигнал предназначен для показа на традиционном телемониторе или приемнике, то кодирование должно быть из ITU-R BT.601 или 709:

$$R_O' = 16 + 219R_C', \quad G_O' = 16 + 219G_C \quad \text{и} \quad B_O' = 16 + 219B_C' \qquad [63]$$

так, чтобы уровень чёрного был на цифровом уровне 16, а номинальные пиковые сигналы – на 235. Обратите внимание, что обрезать видеосигналы на пиковом уровне не нужно, они могут проходить уровень 235. В презентации таблицы ColorChecker® должно быть указано, какие правила кодирования использованы.

Презентация результатов TLMF-2013 такая же, но должна давать также название эталонного прибора. Кроме того, в названии презентации результатов должно быть указано, что это TMLF, а не TLCI.

2.1 Расчёт таблицы рекомендаций для колористов

Каждый тестируемый цвет должен быть распределен по сектору оттенков. Математика включает традиционное телевизионное кодирование, т.к. на этой основе колорист будет производить цветокоррекцию. Поэтому для каждого тестируемого образца i, при освещении тестируемым прибором T, оттенок можно вычислить как функцию $f_{hue}(R, G, B)$, которая берет в качестве аргументов $R_{C,T,i}'$ $G_{C,T,i}'$ и $B_{C,T,i}'$:

$$Y' = 0.2126R_C' + 0.7152G_C' + 0.0722B_C' \qquad [64]$$

$$CR = 0.6350(R_C' - Y') \quad \text{и} \quad CB = 0.5389(B_C' - Y') \qquad [65]$$

…и можно вычислить оттенок (Hue):

$$Hue = \begin{cases} 0, & CB = 0 \\ arctan\left(\frac{CR}{CB}\right), & CB <> 0 \end{cases} \qquad [66]$$

…который должен выражаться в градусах.

Если $CB < 0$, добавить 180 к *Hue*

Если $CB > 0$, добавить 360 к *Hue*

…и нужно следить, чтобы результат был между 0 и 360 градусов.

Тогда $f_{hue}(R, G, B) = Hue$.

С помощью этой функции можно определить сектор оттенка:

$$Sector = \frac{f_{hue}\left(R'_{T,i}, G'_{T,i}, B'_{T,i}\right) - f_{hue}(1,0,0) + 15}{30} \qquad [67]$$

Обратите внимание, что $f_{hue}(1,0,0)$ – это угол оттенка красного основного цвета, начальная точка круга, а всего там 12 секторов по 30º, поэтому данная формула центрирует сектора по основным и вторичным цветам и по промежуточным цветам между ними. Кроме того, $Sector$ – это целое число, а не номер плавающей точки.

Определив, в какой сектор попадает тестируемый образец, можно вывести отдельные средние значения для ΔL^*, ΔC^* и ΔH^*. В отчете о результатах число знаков “+” или “–“ выводится из:

$$6\Delta / k$$

Где Δ – это ΔL^*, ΔC^* или ΔH^*, а k – значение взвешивания, использованное в формуле для Q_a, 3.16.

Примечание: возможно, что в некоторые сектора оттенков не будет распределено цветов во время вычислений. В таких случаях можно интерполировать значения в соседних секторах для обеспечения данных таблицы.

3. Библиография

Sproson, W. N. & Taylor, E. W. (1971)	**A colour television illumination consistency index.**	*BBC Research Department Report 1971-45*
Taylor, E. W. (1982)	**Rank order difference analysis applied to tests of the Television Consistency Index**	*BBC Research Department Report 1982-10*
Taylor, E. W. (1988)	**The assessment of the colorimetric properties of light sources for use in television scene lighting**	*BBC Research Department Report 1988-2*
CIE, 1995	**Method of measuring and specifying colour rendering properties of light sources (Ed. 2)**	*Publication CIE No. 13.3 (TC-3.3), Bureau Central de la CIE, Париж, 1995.*
Roberts, A., Emmett, J. & Böhler, P (2011)	**A Television Lighting Consistency Index**	*Proceedings, IBC 2011, Амстердам*
Roberts, A. (2011)	**Why does it take so long to get a new standard adopted?**	*The Iris, Creative Video Productions Ltd, III кв. 2011*
CIE, 2004	**Colorimetry**	*Publication No. 15.3, Bureau Central de la CIE, Париж, 2004.*
McCamy, C. S., Marcus, H. & Davidson, J. G.	**A color-rendition chart**	*Journal of Applied Photographic Engineering, Vol. 2, #3, лето 1976.*
CIE, 2001	**Improvement to industrial colour-difference evaluation**	*CIE Publication No. 142-2001, Bureau Central de la CIE, Париж, 2001*
EBU, 2012	**Television Lighting Consistency Index-2012**	*EBU Tech 3355*
Roberts, A.	**Circles of Confusion**	*EBU, 2009*
Wyszecki, G. & Styles, W. S. (1982)	**Color Scence: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae, (Ed. 2)**	*John Wiley & sons, 2008*
Reinhard, E., Khan, E. A., Akyüz, A. O. & Johnson, G. M.	**Color imaging, fundamentals and applications**	*A. K. Peters, 2008*

Приложение 1: Таблица сравнения цветовых характеристик CIE 1931, 2º observer

Значения для этой таблицы взяты из CIE Tech.15:2004 ‘Colorimetry’.

nm	*x*	*y*	*z*	nm	*x*	*y*	*z*
380	0.001368	0.000039	0.006450	**575**	0.842500	0.915400	0.001800
385	0.002236	0.000064	0.010550	**580**	0.916300	0.870000	0.001650
390	0.004243	0.000120	0.020050	**585**	0.978600	0.816300	0.001400
395	0.007650	0.000217	0.036210	**590**	1.026300	0.757000	0.001100
400	0.014310	0.000396	0.067850	**595**	1.056700	0.694900	0.001000
405	0.023190	0.000640	0.110200	**600**	1.062200	0.631000	0.000800
410	0.043510	0.001210	0.207400	**605**	1.045600	0.566800	0.000600
415	0.077630	0.002180	0.371300	**610**	1.002600	0.503000	0.000340
420	0.134380	0.004000	0.645600	**615**	0.938400	0.441200	0.000240
425	0.214770	0.007300	1.039050	**620**	0.854450	0.381000	0.000190
430	0.283900	0.011600	1.385600	**625**	0.751400	0.321000	0.000100
435	0.328500	0.016840	1.622960	**630**	0.642400	0.265000	0.000050
440	0.348280	0.023000	1.747060	**635**	0.541900	0.217000	0.000030
445	0.348060	0.029800	1.782600	**640**	0.447900	0.175000	0.000020
450	0.336200	0.038000	1.772110	**645**	0.360800	0.138200	0.000010
455	0.318700	0.048000	1.744100	**650**	0.283500	0.107000	0.000000
460	0.290800	0.060000	1.669200	**655**	0.218700	0.081600	0.000000
465	0.251100	0.073900	1.528100	**660**	0.164900	0.061000	0.000000
470	0.195360	0.090980	1.287640	**665**	0.121200	0.044580	0.000000
475	0.142100	0.112600	1.041900	**670**	0.087400	0.032000	0.000000
480	0.095640	0.139020	0.812950	**675**	0.063600	0.023200	0.000000
485	0.057950	0.169300	0.616200	**680**	0.046770	0.017000	0.000000
490	0.032010	0.208020	0.465180	**685**	0.032900	0.011920	0.000000
495	0.014700	0.258600	0.353300	**690**	0.022700	0.008210	0.000000
500	0.004900	0.323000	0.272000	**695**	0.015840	0.005723	0.000000
505	0.002400	0.407300	0.212300	**700**	0.011359	0.004102	0.000000
510	0.009300	0.503000	0.158200	**705**	0.008111	0.002929	0.000000
515	0.029100	0.608200	0.111700	**710**	0.005790	0.002091	0.000000
520	0.063270	0.710000	0.078250	**715**	0.004109	0.001484	0.000000
525	0.109600	0.793200	0.057250	**720**	0.002899	0.001047	0.000000
530	0.165500	0.862000	0.042160	**725**	0.002049	0.000740	0.000000
535	0.225750	0.914850	0.029840	**730**	0.001440	0.000520	0.000000
540	0.290400	0.954000	0.020300	**735**	0.001000	0.000361	0.000000
545	0.359700	0.980300	0.013400	**740**	0.000690	0.000249	0.000000
550	0.433450	0.994950	0.008750	**745**	0.000476	0.000172	0.000000
555	0.512050	1.000000	0.005750	**750**	0.000332	0.000120	0.000000
560	0.594500	0.995000	0.003900	**755**	0.000235	0.000085	0.000000
565	0.678400	0.978600	0.002750	**760**	0.000166	0.000060	0.000000
570	0.762100	0.952000	0.002100				

	x	*y*	*z*
сумма	21.371524	21.371327	21.371540

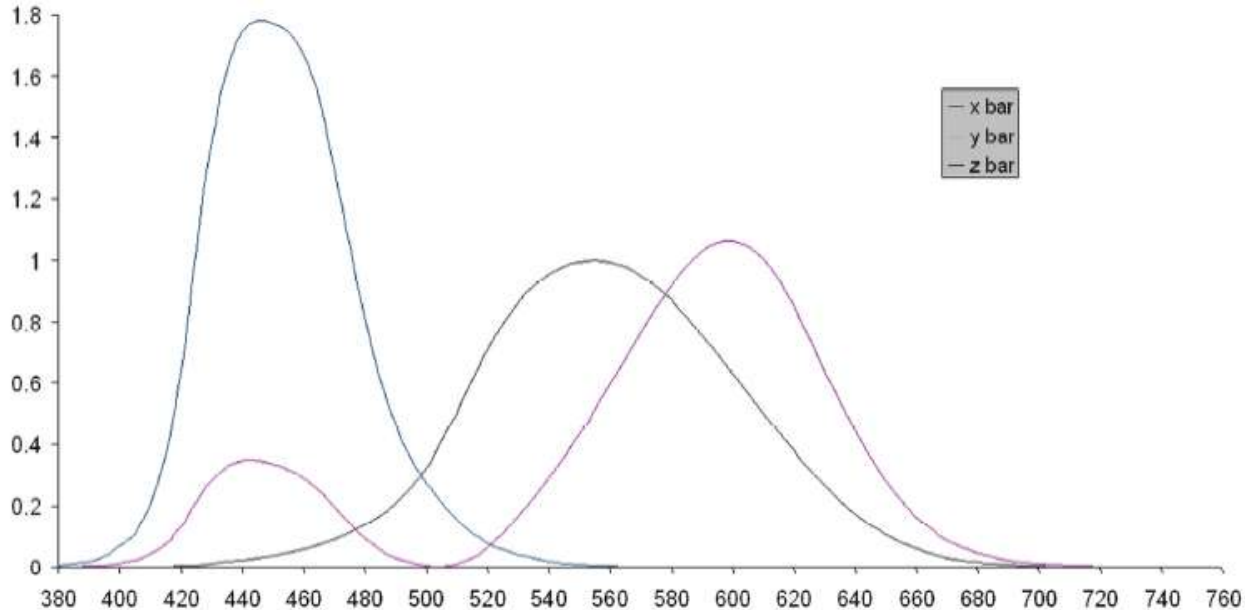

Рис. A1.1: Функции сравнения цветовых характеристик CIE 1931, 2º observer

Приложение 2: Цветность излучателей на кривой Планка и дневного света

Значения в таблицах вычислены из первых принципов и ранее не публиковались.

Планковские излучатели								
T	***x***	***y***	***T***	***x***	***y***	***T***	***x***	***y***
1000	0.652831	0.344390	**2000**	0.526687	0.413296	**3000**	0.436940	0.404082
1020	0.650005	0.346883	**2020**	0.524513	0.413618	**3010**	0.436230	0.403837
1040	0.647189	0.349337	**2040**	0.522353	0.413908	**3020**	0.435524	0.403591
1060	0.644385	0.351751	**2060**	0.520209	0.414169	**3030**	0.434821	0.403344
1080	0.641592	0.354123	**2080**	0.518080	0.414400	**3040**	0.434121	0.403095
1100	0.638811	0.356452	**2100**	0.515967	0.414602	**3050**	0.433424	0.402845
1120	0.636041	0.358738	**2120**	0.513869	0.414776	**3060**	0.432731	0.402593
1140	0.633284	0.360979	**2140**	0.511787	0.414924	**3070**	0.432041	0.402341
1160	0.630538	0.363174	**2160**	0.509720	0.415044	**3080**	0.431355	0.402087
1180	0.627805	0.365322	**2180**	0.507669	0.415139	**3090**	0.430672	0.401832
1200	0.625084	0.367424	**2200**	0.505634	0.415209	**3100**	0.429992	0.401576
1220	0.622375	0.369478	**2220**	0.503615	0.415254	**3110**	0.429315	0.401319
1240	0.619678	0.371485	**2240**	0.501611	0.415275	**3120**	0.428642	0.401061
1260	0.616993	0.373442	**2260**	0.499623	0.415274	**3130**	0.427971	0.400802
1280	0.614321	0.375351	**2280**	0.497651	0.415250	**3140**	0.427304	0.400542
1300	0.611661	0.377212	**2300**	0.495695	0.415204	**3150**	0.426641	0.400281
1320	0.609013	0.379023	**2320**	0.493755	0.415137	**3160**	0.425980	0.400019
1340	0.606377	0.380784	**2340**	0.491830	0.415049	**3170**	0.425322	0.399756
1360	0.603754	0.382497	**2360**	0.489922	0.414941	**3180**	0.424668	0.399492
1380	0.601143	0.384160	**2380**	0.488029	0.414814	**3190**	0.424017	0.399227
1400	0.598544	0.385774	**2400**	0.486152	0.414669	**3200**	0.423369	0.398962
1420	0.595958	0.387338	**2420**	0.484291	0.414505	**3210**	0.422724	0.398696
1440	0.593384	0.388854	**2440**	0.482445	0.414323	**3220**	0.422082	0.398429
1460	0.590822	0.390321	**2460**	0.480615	0.414125	**3230**	0.421444	0.398161
1480	0.588273	0.391740	**2480**	0.478801	0.413910	**3240**	0.420808	0.397892
1500	0.585737	0.393111	**2500**	0.477003	0.413679	**3250**	0.420175	0.397623
1520	0.583213	0.394434	**2520**	0.475220	0.413433	**3300**	0.417058	0.396267
1540	0.580702	0.395709	**2540**	0.473453	0.413172	**3350**	0.414015	0.394898
1560	0.578203	0.396938	**2560**	0.471701	0.412896	**3400**	0.411044	0.393516
1580	0.575718	0.398120	**2580**	0.469964	0.412607	**3450**	0.408144	0.392126
1600	0.573245	0.399257	**2600**	0.468244	0.412304	**3500**	0.405314	0.390729
1620	0.570786	0.400348	**2620**	0.466538	0.411988	**3550**	0.402551	0.389327
1640	0.568340	0.401394	**2640**	0.464848	0.411660	**3600**	0.399854	0.387923
1660	0.565907	0.402396	**2660**	0.463172	0.411319	**3650**	0.397221	0.386517
1680	0.563487	0.403354	**2680**	0.461512	0.410968	**3700**	0.394650	0.385112
1700	0.561081	0.404269	**2700**	0.459867	0.410605	**3750**	0.392141	0.383709
1720	0.558689	0.405141	**2720**	0.458237	0.410231	**3800**	0.389690	0.382309
1740	0.556310	0.405972	**2740**	0.456622	0.409847	**3850**	0.387298	0.380914
1760	0.553945	0.406762	**2760**	0.455022	0.409453	**3900**	0.384962	0.379524
1780	0.551594	0.407512	**2780**	0.453436	0.409049	**3950**	0.382680	0.378141
1800	0.549257	0.408221	**2800**	0.451865	0.408636	**4000**	0.380452	0.376766
1820	0.546934	0.408892	**2820**	0.450309	0.408215	**4100**	0.376149	0.374040
1840	0.544626	0.409525	**2840**	0.448767	0.407785	**4200**	0.372043	0.371354
1860	0.542332	0.410120	**2860**	0.447239	0.407347	**4300**	0.368123	0.368711
1880	0.540053	0.410678	**2880**	0.445726	0.406901	**4400**	0.364379	0.366115
1900	0.537788	0.411200	**2900**	0.444227	0.406448	**4500**	0.360801	0.363569
1920	0.535538	0.411687	**2920**	0.442742	0.405988	**4600**	0.357382	0.361074
1940	0.533303	0.412139	**2940**	0.441271	0.405521	**4700**	0.354111	0.358633
1960	0.531083	0.412558	**2960**	0.439813	0.405047	**4800**	0.350981	0.356246
1980	0.528877	0.412943	**2980**	0.438370	0.404568	**4900**	0.347986	0.353914

	x	*y*
сумма	74.09476	59.83175

Излучатели дневного света								
T	***x***	***y***	***T***	***x***	***y***	***T***	***x***	***y***
5001	0.345741	0.358666	**6450**	0.313597	0.329994	**7000**	0.305357	0.321646
5100	0.342868	0.356356	**6460**	0.313432	0.329831	**7100**	0.304017	0.320250
5200	0.340114	0.354094	**6470**	0.313268	0.329669	**7200**	0.302723	0.318891
5300	0.337471	0.351882	**6480**	0.313104	0.329507	**7300**	0.301472	0.317568
5400	0.334936	0.349720	**6490**	0.312941	0.329345	**7400**	0.300262	0.316280
5500	0.332502	0.347608	**6500**	0.312779	0.329183	**7500**	0.299091	0.315025
5600	0.330164	0.345546	**6510**	0.312617	0.329023	**7600**	0.297958	0.313803
5700	0.327919	0.343535	**6520**	0.312456	0.328862	**7700**	0.296862	0.312612
5800	0.325761	0.341574	**6530**	0.312295	0.328702	**7800**	0.295799	0.311452
5900	0.323687	0.339662	**6540**	0.312135	0.328545	**7900**	0.294770	0.310322
6000	0.321692	0.337798	**6550**	0.311975	0.328383	**8000**	0.293772	0.309220
6020	0.321302	0.337431	**6560**	0.311816	0.328225	**8250**	0.291406	0.306583
6040	0.320915	0.337067	**6570**	0.311658	0.328066	**8500**	0.289211	0.304106
6060	0.320531	0.336703	**6580**	0.311500	0.327909	**8750**	0.287168	0.301776
6080	0.320150	0.336342	**6590**	0.311343	0.327751	**9000**	0.285265	0.299582
6100	0.319772	0.335983	**6600**	0.311186	0.327594	**9250**	0.283487	0.297513
6120	0.319397	0.335626	**6620**	0.310875	0.327281	**9500**	0.281823	0.295559
6140	0.319024	0.335270	**6640**	0.310565	0.326970	**9750**	0.280264	0.293713
6160	0.318655	0.334917	**6660**	0.310258	0.326661	**10000**	0.278800	0.291967
6180	0.318288	0.334565	**6680**	0.309953	0.326353	**11000**	0.273748	0.285843
6200	0.317924	0.334215	**6700**	0.309651	0.326047	**12000**	0.269709	0.280836
6220	0.317563	0.333867	**6720**	0.309350	0.325742	**13000**	0.266417	0.276683
6240	0.317204	0.333521	**6740**	0.309051	0.325439	**14000**	0.263689	0.273192
6260	0.316848	0.333176	**6760**	0.308755	0.325138	**15000**	0.261397	0.270224
6280	0.316495	0.332834	**6780**	0.308461	0.324838	**16000**	0.259447	0.267674
6300	0.316145	0.332493	**6800**	0.308169	0.324540	**17000**	0.257770	0.265464
6320	0.315797	0.332154	**6820**	0.307879	0.324244	**18000**	0.256315	0.263531
6340	0.315451	0.331817	**6840**	0.307591	0.323949	**19000**	0.255041	0.261830
6360	0.315109	0.331481	**6860**	0.307305	0.323656	**20000**	0.253918	0.260321
6380	0.314768	0.331148	**6880**	0.307020	0.323364	**21000**	0.252921	0.258976
6400	0.314431	0.330816	**6900**	0.306738	0.323074	**22000**	0.252030	0.257769
6410	0.314263	0.330651	**6920**	0.306458	0.322785	**23000**	0.251230	0.256681
6420	0.314095	0.330486	**6940**	0.306180	0.322498	**24000**	0.250508	0.255696
6430	0.313929	0.330322	**6960**	0.305904	0.322213	**25000**	0.249854	0.254799
6440	0.313763	0.330158	**6980**	0.305630	0.321929			

	x	*y*
сумма	31.57207	33.10417

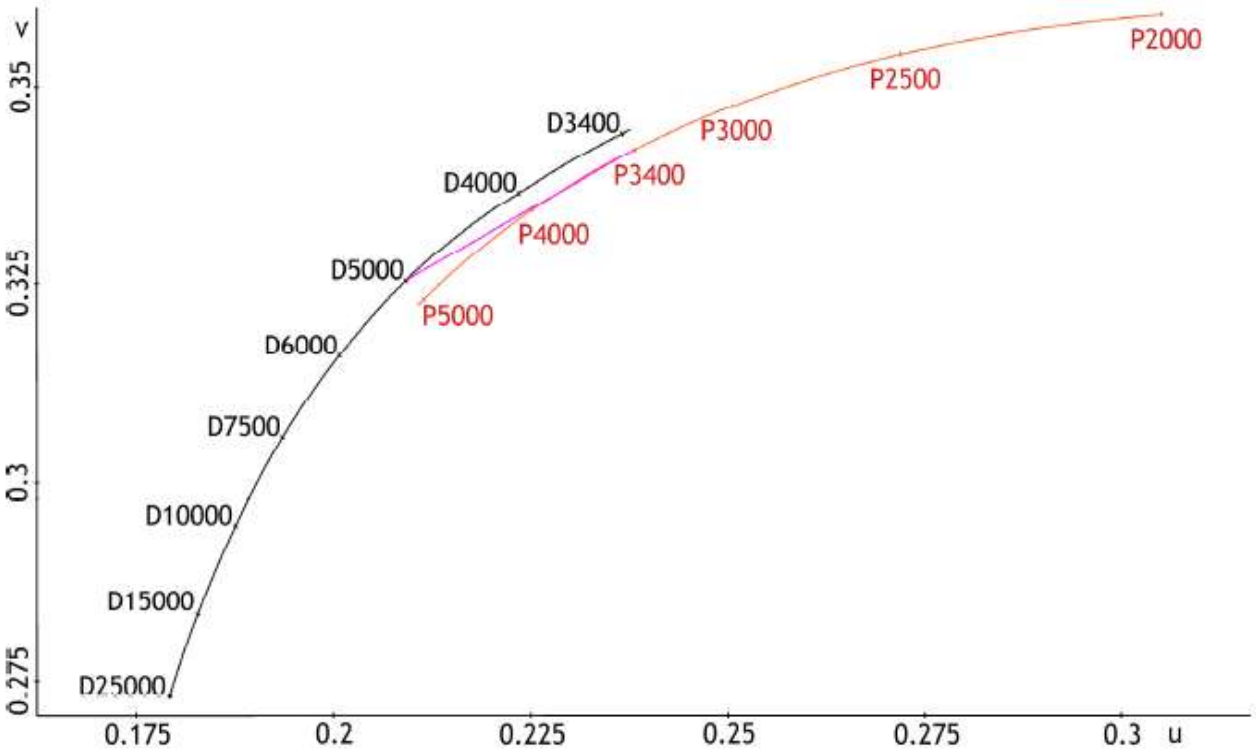

Рис. A2.1: Схема цветности, области планковского и дневного света с областью смешанного освещения, CIE 1960

Приложение 3: Векторы излучения дневного света

Значения в этой таблице взяты из CIE Tech.15:2004 ‘Colorimetry’.

nm	S_0	S_1	S_2
380	63.4	38.5	3.0
385	62.45000	35.98125	2.05
390	65.8	35.0	1.2
395	79.825	38.8	-0.1
400	94.8	43.4	-1.1
405	101.54375	45.525	-0.93125
410	104.8	46.3	-0.5
415	106.54375	45.70625	-0.53125
420	105.9	43.9	-0.7
425	100.35	40.375	-0.875
430	96.8	37.1	-1.2
435	104.05	36.525	-1.9125
440	113.9	36.7	-2.6
445	120.825	36.48125	-2.84375
450	125.6	35.9	-2.9
455	126.54375	34.49375	-2.88125
460	125.5	32.6	-2.8
465	123.39375	30.26875	-2.69375
470	121.3	27.9	-2.6
475	121.525	26.06875	-2.6375
480	121.3	24.3	-2.6
485	117.425	22.21875	-2.21875
490	113.5	20.1	-1.8
495	112.95625	18.075	-1.6125
500	113.1	16.2	-1.5
505	112.19375	14.74375	-1.3875
510	110.8	13.2	-1.3
515	108.3625	10.86875	-1.25
520	106.5	8.6	-1.2
525	107.6	7.18125	-1.125
530	108.8	6.1	-1
535	107.25	5.1375	-0.75
540	105.3	4.2	-0.5
545	104.90625	3.05	-0.3875
550	104.4	1.9	-0.3
555	102.39375	0.90625	-0.15
560	100.0	0.0	0.0
565	97.78125	-0.8	0.1
570	96.0	-1.6	0.2

nm	S_0	S_1	S_2
575	95.675	-2.65	0.2625
580	95.1	-3.5	0.5
585	91.95625	-3.475	1.25
590	89.1	-3.5	2.1
595	89.4375	-4.5625	2.69375
600	90.5	-5.8	3.2
605	90.60625	-6.55625	3.68125
610	90.3	-7.2	4.1
615	89.6125	-7.93125	4.43125
620	88.4	-8.6	4.7
625	86.0125	-9.05	4.8375
630	84.0	-9.5	5.1
635	84.475	-10.26875	5.8875
640	85.1	-10.9	6.7
645	83.525	-10.80625	7.01875
650	81.9	-10.7	7.3
655	81.90625	-11.2125	7.9125
660	82.6	-12.0	8.6
665	84.01875	-13.10625	9.25625
670	84.9	-14.0	9.8
675	83.83125	-14.025	10.19375
680	81.3	-13.6	10.2
685	76.225	-12.69375	9.19375
690	71.9	-12.0	8.3
695	72.38125	-12.575	8.9
700	74.3	-13.3	9.6
705	76.31875	-13.325	9.225
710	76.4	-12.9	8.5
715	69.45625	-11.6625	7.64375
720	63.3	-10.6	7.0
725	66.35	-10.91875	7.18125
730	71.7	-11.6	7.6
735	75.6125	-12.0875	7.91875
740	77.0	-12.2	8.0
745	72.525	-11.3875	7.46875
750	65.2	-10.2	6.7
755	54.40625	-8.6625	5.73125
760	47.7	-7.8	5.2

	S_0	S_1	S_2
сумма	7140.45	545.05	201.55

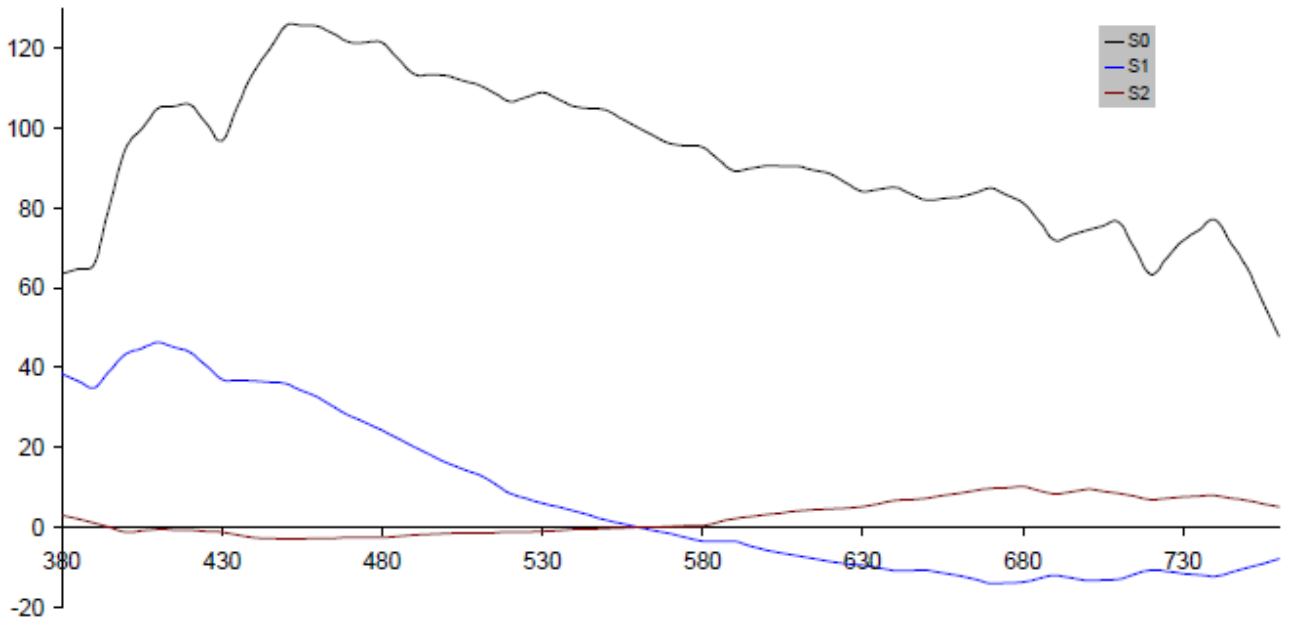

Рис. A3.1: Векторы дневного света

Приложение 4: Коэффициенты отражения ColorChecker®

Значения для таблиц взяты из "The assessment of the colorimetric properties of light sources for use in television scene lighting", E.W. Taylor, BBC R&D Report 1988/2

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
nm	**Темный телесный**	**Светлый телесный**	**Синее небо**	**Листва**	**Синий цветок**	**Сине-зеленый**	**Оранже-вый**	**Лилово-синий**	**Умеренно красный**
380	0.054	0.092	0.105	0.050	0.101	0.108	0.052	0.094	0.088
385	0.057	0.109	0.127	0.052	0.127	0.132	0.054	0.113	0.102
390	0.063	0.134	0.164	0.052	0.170	0.168	0.052	0.141	0.121
395	0.066	0.161	0.213	0.050	0.233	0.213	0.050	0.186	0.136
400	0.075	0.186	0.271	0.052	0.310	0.260	0.052	0.235	0.151
405	0.078	0.200	0.314	0.052	0.373	0.292	0.052	0.275	0.153
410	0.078	0.205	0.333	0.052	0.409	0.308	0.052	0.297	0.151
415	0.076	0.206	0.344	0.053	0.424	0.317	0.051	0.316	0.144
420	0.074	0.207	0.345	0.051	0.432	0.320	0.050	0.317	0.142
425	0.070	0.209	0.344	0.053	0.437	0.328	0.050	0.333	0.141
430	0.066	0.211	0.346	0.053	0.437	0.336	0.052	0.346	0.139
435	0.064	0.213	0.346	0.053	0.438	0.342	0.050	0.355	0.135
440	0.062	0.216	0.347	0.055	0.437	0.352	0.051	0.368	0.136
445	0.060	0.221	0.343	0.058	0.432	0.360	0.051	0.378	0.135
450	0.059	0.227	0.337	0.059	0.428	0.371	0.052	0.381	0.133
455	0.060	0.237	0.333	0.061	0.423	0.386	0.051	0.377	0.132
460	0.058	0.246	0.327	0.060	0.417	0.405	0.051	0.368	0.129
465	0.060	0.259	0.324	0.063	0.412	0.433	0.053	0.356	0.130
470	0.060	0.273	0.319	0.063	0.405	0.465	0.053	0.340	0.129
475	0.062	0.285	0.306	0.067	0.395	0.497	0.054	0.322	0.127
480	0.058	0.294	0.290	0.065	0.380	0.528	0.055	0.296	0.121
485	0.063	0.304	0.288	0.067	0.373	0.557	0.056	0.269	0.118
490	0.063	0.305	0.280	0.069	0.364	0.576	0.055	0.241	0.109
495	0.067	0.309	0.274	0.072	0.355	0.591	0.058	0.220	0.105
500	0.068	0.314	0.265	0.077	0.342	0.586	0.061	0.197	0.105
505	0.070	0.323	0.258	0.088	0.333	0.591	0.063	0.182	0.104
510	0.072	0.334	0.250	0.105	0.316	0.586	0.068	0.166	0.101
515	0.077	0.340	0.240	0.132	0.296	0.582	0.077	0.151	0.100
520	0.079	0.332	0.229	0.159	0.267	0.567	0.086	0.138	0.094
525	0.081	0.316	0.220	0.182	0.245	0.559	0.098	0.127	0.091
530	0.081	0.300	0.212	0.195	0.227	0.545	0.120	0.120	0.089
535	0.083	0.292	0.207	0.199	0.212	0.533	0.145	0.115	0.092
540	0.083	0.290	0.203	0.191	0.206	0.512	0.175	0.108	0.095
545	0.084	0.295	0.198	0.180	0.203	0.492	0.206	0.104	0.097
550	0.084	0.300	0.193	0.167	0.203	0.472	0.236	0.101	0.104
555	0.088	0.302	0.191	0.156	0.204	0.445	0.270	0.095	0.109
560	0.093	0.297	0.187	0.144	0.196	0.429	0.302	0.090	0.111
565	0.098	0.295	0.181	0.133	0.190	0.402	0.341	0.084	0.113
570	0.104	0.304	0.174	0.131	0.190	0.380	0.375	0.082	0.116
575	0.111	0.328	0.170	0.130	0.194	0.355	0.410	0.081	0.134
580	0.121	0.365	0.167	0.129	0.201	0.332	0.440	0.081	0.167
585	0.127	0.409	0.162	0.123	0.210	0.309	0.467	0.081	0.223
590	0.133	0.450	0.158	0.118	0.216	0.284	0.488	0.081	0.291
595	0.140	0.488	0.161	0.114	0.225	0.262	0.509	0.083	0.362
600	0.144	0.520	0.156	0.110	0.228	0.247	0.518	0.083	0.426
605	0.149	0.540	0.152	0.102	0.232	0.233	0.532	0.080	0.474
610	0.151	0.556	0.150	0.101	0.238	0.224	0.540	0.079	0.511
615	0.154	0.566	0.145	0.103	0.240	0.217	0.551	0.080	0.537
620	0.160	0.574	0.142	0.104	0.236	0.212	0.557	0.081	0.551

625	0.164	0.582	0.137	0.105	0.236	0.209	0.562	0.081	0.562
630	0.170	0.593	0.133	0.105	0.240	0.207	0.568	0.084	0.565
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
nm	**Темный телесный**	**Светлый телесный**	**Синее небо**	**Листва**	**Синий цветок**	**Сине-зеленый**	**Оранже-вый**	**Лилово-синий**	**Умеренно красный**
635	0.175	0.602	0.132	0.106	0.248	0.205	0.575	0.089	0.570
640	0.179	0.607	0.126	0.102	0.261	0.200	0.581	0.092	0.575
645	0.184	0.625	0.127	0.102	0.289	0.198	0.584	0.096	0.574
650	0.193	0.631	0.121	0.101	0.322	0.199	0.585	0.103	0.579
655	0.203	0.639	0.118	0.101	0.362	0.197	0.590	0.107	0.577
660	0.213	0.655	0.115	0.101	0.407	0.199	0.601	0.112	0.579
665	0.220	0.661	0.115	0.101	0.446	0.203	0.596	0.111	0.577
670	0.236	0.687	0.112	0.107	0.488	0.210	0.600	0.112	0.580
675	0.241	0.693	0.110	0.115	0.512	0.216	0.596	0.109	0.581
680	0.248	0.711	0.110	0.132	0.546	0.218	0.604	0.104	0.579
685	0.257	0.722	0.109	0.152	0.546	0.226	0.603	0.102	0.581
690	0.269	0.737	0.108	0.185	0.555	0.232	0.606	0.099	0.581
695	0.280	0.757	0.108	0.233	0.563	0.236	0.607	0.099	0.583
700	0.289	0.768	0.106	0.283	0.564	0.238	0.608	0.100	0.581
705	0.300	0.786	0.105	0.339	0.575	0.242	0.615	0.100	0.581
710	0.314	0.798	0.105	0.383	0.578	0.242	0.617	0.103	0.580
715	0.337	0.815	0.106	0.419	0.586	0.239	0.621	0.106	0.586
720	0.346	0.822	0.106	0.444	0.590	0.232	0.622	0.109	0.585
725	0.361	0.823	0.105	0.445	0.589	0.227	0.619	0.113	0.584
730	0.382	0.835	0.107	0.465	0.601	0.229	0.625	0.122	0.589
735	0.404	0.845	0.105	0.473	0.604	0.230	0.628	0.127	0.587
740	0.425	0.855	0.106	0.477	0.606	0.237	0.630	0.138	0.590
745	0.439	0.848	0.105	0.480	0.605	0.248	0.627	0.153	0.582
750	0.464	0.862	0.108	0.489	0.614	0.256	0.635	0.173	0.589
755	0.476	0.861	0.107	0.492	0.616	0.269	0.639	0.193	0.592
760	0.490	0.868	0.110	0.498	0.617	0.274	0.640	0.215	0.590

	Темный телесный	**Светлый телесный**	**Синее небо**	**Листва**	**Синий цветок**	**Сине-зеленый**	**Оран-жевый**	**Лилово-синий**	**Умеренно красный**
сумма	12.447	35.427	14.953	12.29	28.328	25.319	25.876	24.563	201.9

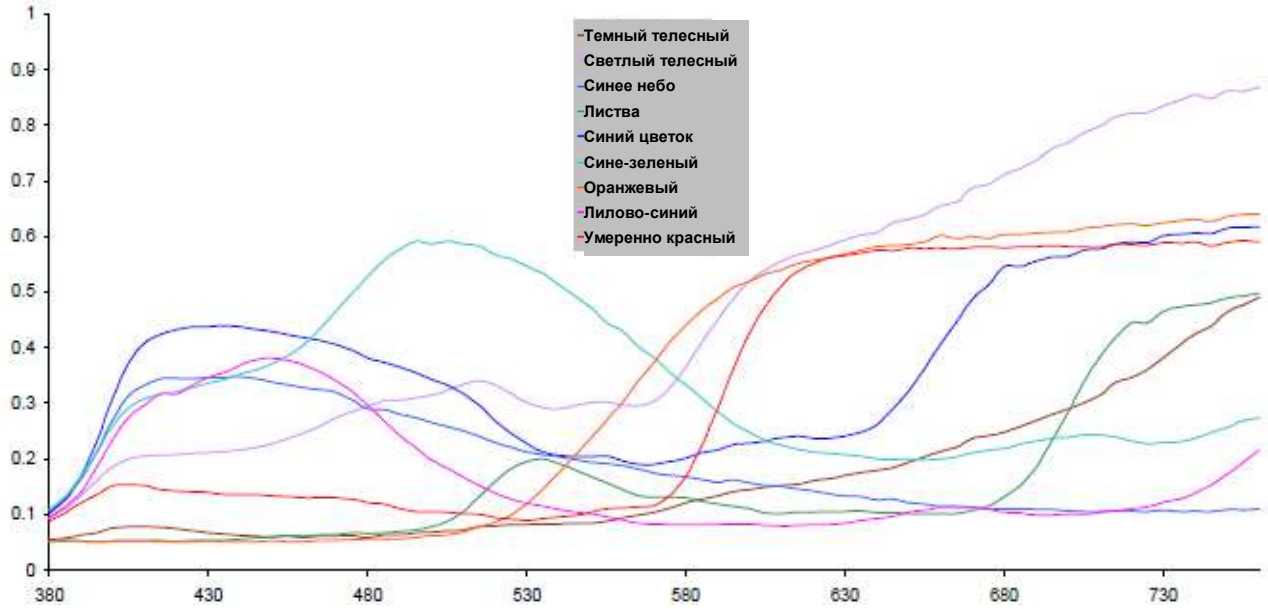

Рис. A4.1: Коэффициенты отражения, образцы 1 – 9

	10	11	12	13	14	15	16	17	18
nm	**Фиоле-товый**	**Желто-зеленый**	**Оранжево-желтый**	**Синий**	**Зеле-ный**	**Крас-ный**	**Жел-тый**	**Пур-пурный**	**Голу-бой**
380	0.083	0.045	0.049	0.068	0.045	0.043	0.047	0.106	0.085
385	0.100	0.048	0.052	0.084	0.048	0.045	0.047	0.129	0.102
390	0.125	0.050	0.054	0.104	0.054	0.046	0.048	0.168	0.130
395	0.154	0.050	0.055	0.127	0.054	0.045	0.047	0.229	0.163
400	0.183	0.054	0.054	0.156	0.057	0.047	0.050	0.297	0.201
405	0.198	0.053	0.057	0.178	0.059	0.046	0.052	0.346	0.228
410	0.206	0.053	0.057	0.194	0.060	0.048	0.052	0.367	0.247
415	0.207	0.055	0.059	0.209	0.060	0.046	0.051	0.372	0.254
420	0.207	0.053	0.057	0.221	0.060	0.046	0.051	0.377	0.262
425	0.201	0.057	0.057	0.234	0.062	0.046	0.053	0.373	0.278
430	0.194	0.059	0.059	0.250	0.054	0.048	0.053	0.362	0.282
435	0.184	0.059	0.057	0.264	0.064	0.044	0.053	0.351	0.300
440	0.175	0.062	0.058	0.287	0.069	0.046	0.057	0.340	0.319
445	0.163	0.065	0.060	0.308	0.070	0.047	0.056	0.323	0.332
450	0.154	0.070	0.061	0.318	0.075	0.047	0.058	0.306	0.348
455	0.142	0.075	0.061	0.323	0.079	0.047	0.060	0.293	0.363
460	0.129	0.081	0.062	0.317	0.083	0.046	0.062	0.276	0.382
465	0.120	0.092	0.067	0.303	0.090	0.046	0.067	0.259	0.401
470	0.109	0.102	0.072	0.276	0.099	0.044	0.076	0.250	0.419
475	0.102	0.116	0.081	0.255	0.109	0.044	0.090	0.234	0.431
480	0.095	0.136	0.088	0.225	0.120	0.040	0.109	0.220	0.438
485	0.090	0.158	0.098	0.193	0.132	0.042	0.142	0.206	0.441
490	0.081	0.185	0.106	0.160	0.144	0.039	0.183	0.190	0.438
495	0.077	0.225	0.112	0.139	0.158	0.040	0.228	0.179	0.429
500	0.070	0.274	0.120	0.117	0.175	0.040	0.274	0.169	0.415
505	0.067	0.328	0.130	0.104	0.196	0.039	0.319	0.163	0.404
510	0.065	0.390	0.143	0.087	0.231	0.040	0.360	0.152	0.381
515	0.063	0.446	0.163	0.077	0.272	0.040	0.405	0.140	0.358
520	0.059	0.485	0.188	0.066	0.307	0.038	0.443	0.126	0.339
525	0.058	0.511	0.218	0.060	0.338	0.038	0.475	0.113	0.316
530	0.056	0.529	0.256	0.056	0.352	0.039	0.510	0.104	0.288
535	0.053	0.538	0.304	0.053	0.357	0.038	0.544	0.098	0.262
540	0.052	0.539	0.351	0.050	0.353	0.040	0.571	0.098	0.236
545	0.052	0.535	0.399	0.047	0.341	0.040	0.594	0.102	0.210
550	0.051	0.526	0.442	0.045	0.323	0.041	0.612	0.104	0.186
555	0.053	0.521	0.476	0.042	0.305	0.042	0.630	0.103	0.162
560	0.055	0.511	0.505	0.043	0.286	0.044	0.646	0.104	0.142
565	0.056	0.500	0.532	0.040	0.265	0.046	0.656	0.103	0.129
570	0.054	0.484	0.544	0.040	0.244	0.047	0.668	0.106	0.116
575	0.052	0.467	0.561	0.038	0.224	0.054	0.677	0.118	0.105
580	0.053	0.450	0.579	0.038	0.203	0.064	0.691	0.140	0.099
585	0.049	0.435	0.539	0.037	0.180	0.081	0.696	0.170	0.092
590	0.051	0.412	0.597	0.036	0.161	0.112	0.701	0.212	0.088
595	0.055	0.395	0.604	0.037	0.144	0.156	0.702	0.257	0.086
600	0.058	0.377	0.617	0.038	0.124	0.216	0.729	0.313	0.081
605	0.063	0.363	0.617	0.036	0.108	0.283	0.701	0.354	0.077
610	0.073	0.352	0.618	0.037	0.098	0.358	0.704	0.403	0.078
615	0.087	0.346	0.624	0.037	0.089	0.434	0.707	0.457	0.076
620	0.103	0.339	0.625	0.037	0.084	0.499	0.708	0.501	0.076
625	0.120	0.337	0.630	0.039	0.080	0.549	0.713	0.546	0.076
630	0.137	0.337	0.647	0.039	0.076	0.585	0.721	0.587	0.076
635	0.149	0.331	0.635	0.042	0.075	0.607	0.716	0.612	0.076
640	0.161	0.326	0.638	0.040	0.071	0.624	0.717	0.637	0.076

645	0.175	0.322	0.642	0.042	0.071	0.633	0.718	0.655	0.077
650	0.188	0.323	0.649	0.044	0.070	0.650	0.726	0.677	0.078
	10	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
nm	**Фиоле-товый**	**Желто-зеленый**	**Оранжево-желтый**	**Синий**	**Зеле-ный**	**Крас-ный**	**Жел-тый**	**Пур-пурный**	**Голу-бой**
655	0.197	0.320	0.650	0.045	0.067	0.652	0.729	0.684	0.077
660	0.208	0.325	0.649	0.047	0.067	0.652	0.730	0.693	0.081
665	0.218	0.327	0.650	0.048	0.067	0.656	0.728	0.695	0.080
670	0.229	0.334	0.677	0.050	0.068	0.661	0.747	0.714	0.081
675	0.241	0.340	0.657	0.048	0.070	0.666	0.739	0.710	0.079
680	0.249	0.347	0.653	0.046	0.070	0.664	0.737	0.720	0.079
685	0.262	0.355	0.659	0.050	0.074	0.671	0.743	0.715	0.079
690	0.272	0.362	0.658	0.048	0.076	0.671	0.740	0.714	0.077
695	0.284	0.369	0.662	0.051	0.079	0.677	0.756	0.739	0.076
700	0.292	0.373	0.661	0.049	0.080	0.673	0.742	0.719	0.075
705	0.304	0.376	0.666	0.052	0.082	0.678	0.749	0.726	0.074
710	0.312	0.375	0.668	0.054	0.086	0.680	0.751	0.728	0.074
715	0.325	0.379	0.672	0.057	0.085	0.689	0.753	0.733	0.076
720	0.329	0.372	0.671	0.060	0.083	0.688	0.754	0.737	0.077
725	0.333	0.365	0.667	0.065	0.081	0.685	0.750	0.732	0.081
730	0.343	0.367	0.677	0.069	0.081	0.691	0.760	0.743	0.084
735	0.346	0.375	0.678	0.076	0.081	0.694	0.762	0.742	0.090
740	0.350	0.379	0.682	0.087	0.083	0.696	0.769	0.748	0.098
745	0.350	0.388	0.678	0.102	0.086	0.692	0.762	0.741	0.111
750	0.359	0.403	0.686	0.123	0.091	0.698	0.774	0.753	0.130
755	0.360	0.415	0.693	0.147	0.094	0.704	0.776	0.754	0.151
760	0.362	0.430	0.690	0.174	0.098	0.700	0.779	0.761	0.179

	Фиоле-товый	**Желто-зеленый**	**Оранжево-желтый**	**Си-ний**	**Зеле-ный**	**Крас-ный**	**Жел-тый**	**Пур-пурный**	**Голу-бой**
сумма	12.442	23.108	30.89	8.285	9.857	22.533	37.356	30.978	14.543

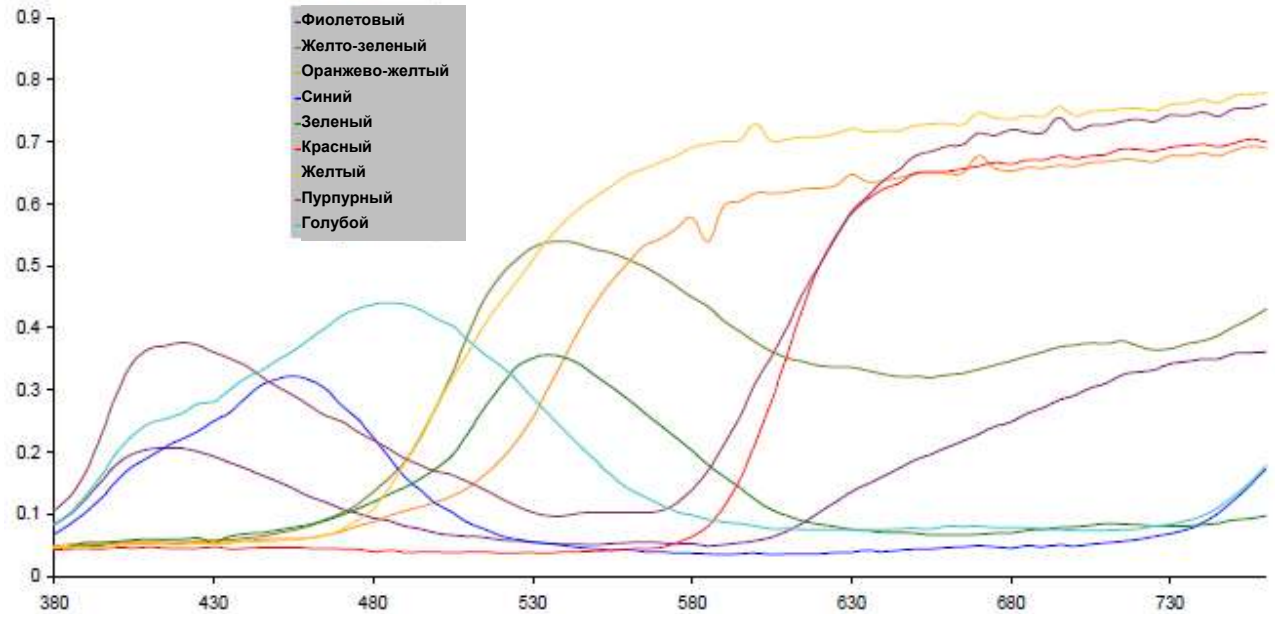

Рис. А4.2: Коэффициенты отражения, образцы 10 - 18

Значения для следующей таблицы взяты из неопубликованных измерений A. Roberts в BBC R&D. Только данные для белого образца взяты из фактических измерений, данные для других образцов масштабированы по известным коэффициентам отражения отдельных образцов. Обратите внимание, что эти цвета не играют роли в вычислениях TLCI.

	19	20	21	22	23	24
nm	**Белый, 90.01%**	**Нейтральный 8, 59.1%**	**Нейтральный 6.5, 36.2%**	**Нейтральный 5, 19.77%**	**Нейтральный 3.5, 9%**	**Черный, 3.13%**
380	0.126	0.084	0.051	0.0277	0.0126	0.00439
385	0.169	0.113	0.068	0.0372	0.0169	0.00589
390	0.212	0.141	0.085	0.0465	0.0212	0.00737
395	0.264	0.176	0.106	0.0580	0.0264	0.00919
400	0.318	0.211	0.128	0.0698	0.0318	0.01105
405	0.491	0.327	0.198	0.1079	0.0491	0.01708
410	0.664	0.442	0.267	0.1457	0.0664	0.02308
415	0.757	0.504	0.305	0.1663	0.0757	0.02635
420	0.851	0.567	0.342	0.1869	0.0851	0.02961
425	0.868	0.578	0.349	0.1907	0.0868	0.03020
430	0.887	0.590	0.357	0.1947	0.0886	0.03084
435	0.888	0.591	0.357	0.1949	0.0887	0.03087
440	0.890	0.592	0.358	0.1954	0.0889	0.03094
445	0.893	0.594	0.359	0.1960	0.0893	0.03105
450	0.895	0.595	0.360	0.1965	0.0895	0.03112
455	0.896	0.596	0.360	0.1967	0.0896	0.03115
460	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
465	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
470	0.902	0.600	0.363	0.1980	0.0902	0.03136
475	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
480	0.897	0.597	0.361	0.1969	0.0897	0.03119
485	0.904	0.602	0.364	0.1985	0.0904	0.03143
490	0.901	0.599	0.362	0.1978	0.0901	0.03133
495	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
500	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
505	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
510	0.897	0.597	0.361	0.1969	0.0897	0.03119
515	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
520	0.902	0.600	0.363	0.1980	0.0902	0.03136
525	0.902	0.600	0.363	0.1980	0.0902	0.03136
530	0.901	0.599	0.362	0.1978	0.0901	0.03133
535	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
540	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
545	0.896	0.596	0.360	0.1967	0.0896	0.03115
550	0.893	0.594	0.359	0.1960	0.0893	0.03105
555	0.895	0.595	0.360	0.1965	0.0895	0.03112
560	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
565	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
570	0.902	0.600	0.363	0.1980	0.0902	0.03136
575	0.904	0.602	0.364	0.1985	0.0904	0.03143
580	0.905	0.602	0.364	0.1987	0.0905	0.03147
585	0.906	0.603	0.364	0.1989	0.0906	0.03150
590	0.907	0.604	0.365	0.1991	0.0907	0.03154
595	0.905	0.602	0.364	0.1987	0.0905	0.03147
600	0.903	0.601	0.363	0.1982	0.0903	0.03140
605	0.904	0.602	0.364	0.1985	0.0904	0.03143
610	0.905	0.602	0.364	0.1987	0.0905	0.03147
615	0.907	0.604	0.365	0.1991	0.0907	0.03154
620	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
625	0.897	0.597	0.361	0.1969	0.0897	0.03119
630	0.896	0.596	0.360	0.1967	0.0896	0.03115
635	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
640	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129

645	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
650	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
	19	**20**	**21**	**22**	**23**	**24**
nm	**Белый, 90.01%**	**Нейтральный 8, 59.1%**	**Нейтральный 6.5, 36.2%**	**Нейтральный 5, 19.77%**	**Нейтральный 3.5, 9%**	**Черный, 3.13%**
655	0.901	0.599	0.362	0.1978	0.0901	0.03133
660	0.904	0.602	0.364	0.1985	0.0904	0.03143
665	0.904	0.602	0.364	0.1985	0.0904	0.03143
670	0.905	0.602	0.364	0.1987	0.0905	0.03147
675	0.902	0.600	0.363	0.1980	0.0902	0.03136
680	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
685	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
690	0.900	0.599	0.362	0.1976	0.0900	0.03129
695	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
700	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
705	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
710	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
715	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
720	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
725	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
730	0.901	0.599	0.362	0.1978	0.0901	0.03133
735	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
740	0.896	0.596	0.360	0.1967	0.0896	0.03115
745	0.895	0.595	0.360	0.1965	0.0895	0.03112
750	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122
755	0.899	0.598	0.361	0.1974	0.0899	0.03126
760	0.898	0.597	0.361	0.1971	0.0898	0.03122

	Белый, 90.01%	**Нейтраль-ный 8, 59.1%**	**Нейтральный 6.5, 36.2%**	**Нейтральный 5, 19.77%**	**Нейтральный 3.5, 9%**	**Черный, 3.13%**
сумма	64.976	43.228	26.128	14.2649	6.4973	2.25924

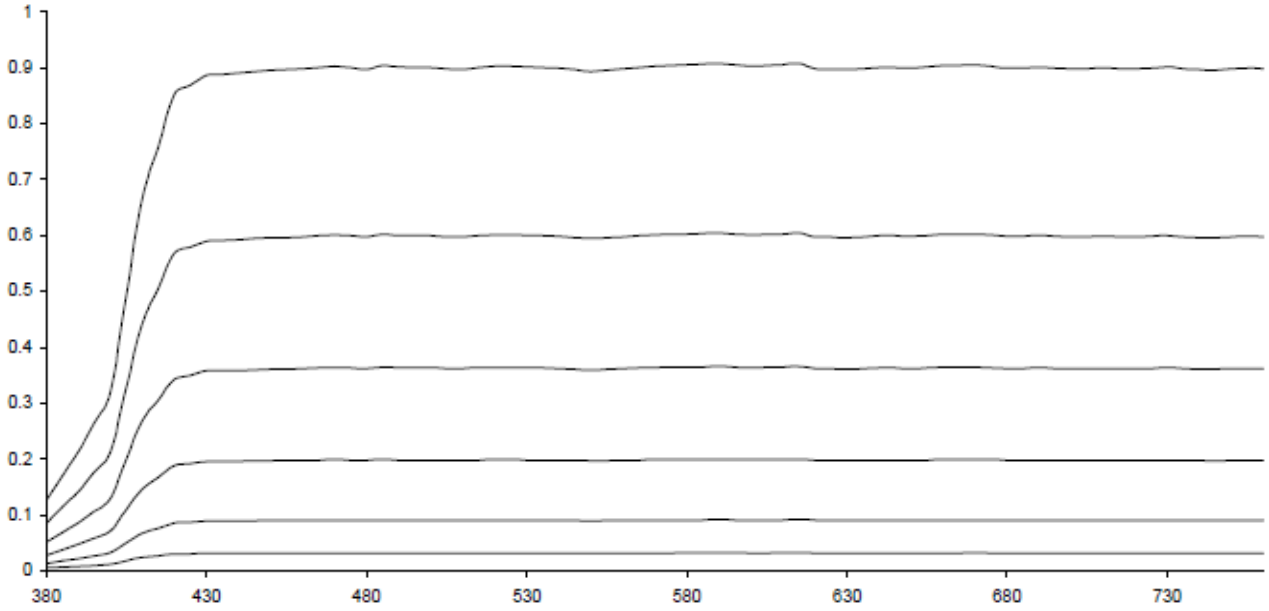

Рис. А4.3: Коэффициенты отражения, образцы 19 - 24, шкала серого

Набор цветов ColorChecker® часто считается неидеальным для телевидения, т.к. один цвет (18, голубой) фактически выпадает из цветовой гаммы телевидения при освещении *D*65, а другой (16, желтый) находится очень близко к границе гаммы. Однако ни одна из этих проблем не влияет на пригодность набора цветов для использования в TLCI-2012.

Кривые чувствительности камер не являются и не могут быть идеальными; матрица камеры обеспечивает лишь приближение к идеальным кривым. На практике матрица обычно вычисляется для оптимизации цветовосприятия камеры при использовании без гамма-коррекции и подаче на воображаемый линейный дисплей. Последующее включение нелинейностей камеры и дисплея значительно повышает насыщенность и создает то, что называется «обликом» камеры. Для использования в TLCI-2012 матрица была оптимизирована с учетом нелинейностей камеры и дисплея, и характеристики телесных тонов (1 и 2) и ненасыщенных цветов (3 – 6) были соблюдены с максимальной точностью, в соответствии с целесообразной точностью других цветов.

На Рис. A4.5 показана характеристика цветности 18 цветовых образцов через стандартную камеру. Каждый цвет помечен черным в цветности, созданной прибором *D*65 независимо от телекамеры и дисплея, пурпурный вектор к голубому кругу показывает, где воспроизводится цвет через камеру и дисплей с установками согласно TLCI-2012.

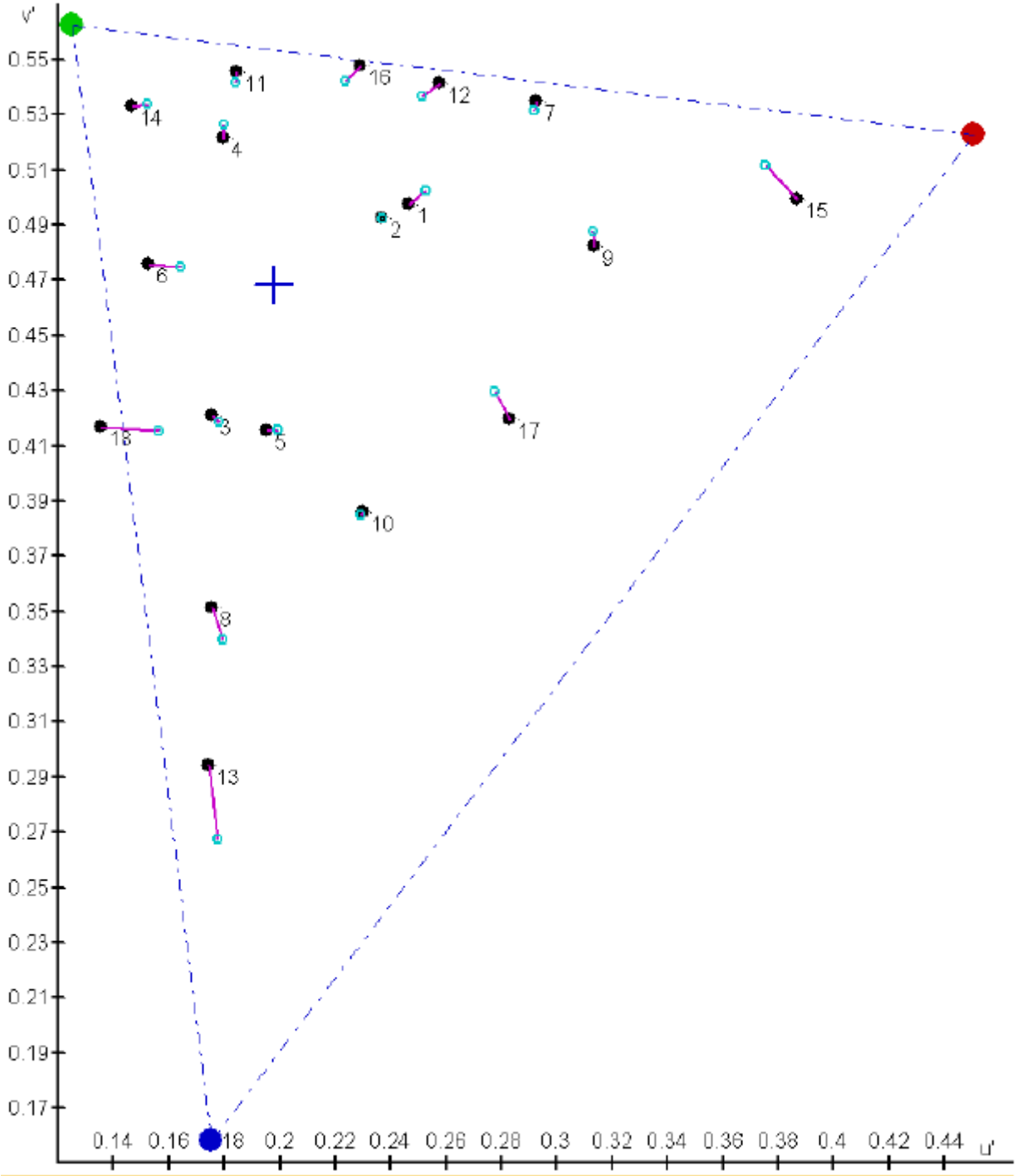

Рис. A4.5: Диаграмма цветности, CIE 1976 u' v'

Приложение 5: Кривые стандартных камер EBU – 2012

Значения для этой таблицы получены из измерений, проведенных Per Böhler [см. EBU Tech 3353].

nm	$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\bar{b}$	nm	$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\bar{b}$
385	0.000000	0.000000	0.000215	**575**	0.032310	0.025210	0.000369
390	0.000000	0.000000	0.000649	**580**	0.054310	0.013264	0.000329
395	0.000000	0.000000	0.001397	**585**	0.067330	0.007350	0.000260
400	0.000000	0.000000	0.003902	**590**	0.072830	0.004418	0.000190
405	0.000000	0.000000	0.007905	**595**	0.073060	0.002611	0.000110
410	0.000450	0.000110	0.014223	**600**	0.071650	0.001707	0.000070
415	0.001000	0.000211	0.021958	**605**	0.068640	0.001084	0.000000
420	0.001230	0.000321	0.029294	**610**	0.063800	0.000482	0.000000
425	0.001300	0.000482	0.036253	**615**	0.059260	0.000030	0.000000
430	0.001300	0.000562	0.042739	**620**	0.054600	0.000011	0.000000
435	0.001190	0.000633	0.048916	**625**	0.049390	0.000008	0.000000
440	0.001120	0.000753	0.055513	**630**	0.044370	0.000006	0.000000
445	0.001040	0.000934	0.061881	**635**	0.039570	0.000003	0.000000
450	0.000930	0.001175	0.068628	**640**	0.034540	0.000000	0.000000
455	0.000860	0.001386	0.073179	**645**	0.029440	0.000000	0.000000
460	0.000820	0.001777	0.075694	**650**	0.025030	0.000000	0.000000
465	0.000820	0.002239	0.077461	**655**	0.021030	0.000000	0.000000
470	0.000890	0.002902	0.078010	**660**	0.017900	0.000000	0.000000
475	0.000890	0.003555	0.074377	**665**	0.014960	0.000000	0.000000
480	0.000970	0.004488	0.066582	**670**	0.012170	0.000000	0.000000
485	0.000890	0.006175	0.053601	**675**	0.009710	0.000000	0.000000
490	0.000890	0.010664	0.036619	**680**	0.007740	0.000000	0.000000
495	0.000890	0.021297	0.022597	**685**	0.005880	0.000000	0.000000
500	0.000930	0.036343	0.012366	**690**	0.004350	0.000000	0.000000
505	0.001040	0.046681	0.008274	**695**	0.002900	0.000000	0.000000
510	0.001120	0.054634	0.006138	**700**	0.002000	0.000000	0.000000
515	0.001340	0.059594	0.004461	**705**	0.001340	0.000000	0.000000
520	0.001490	0.062114	0.003254	**710**	0.000950	0.000000	0.000000
525	0.001710	0.063761	0.002455	**715**	0.000710	0.000000	0.000000
530	0.001790	0.065066	0.001996	**720**	0.000530	0.000000	0.000000
535	0.001670	0.066341	0.001707	**725**	0.000440	0.000000	0.000000
540	0.001410	0.067426	0.001407	**730**	0.000310	0.000000	0.000000
545	0.001150	0.068018	0.001228	**735**	0.000190	0.000000	0.000000
550	0.001120	0.068109	0.000998	**740**	0.000060	0.000000	0.000000
555	0.001190	0.066994	0.000928	**745**	0.000000	0.000000	0.000000
560	0.001710	0.063530	0.000779	**750**	0.000000	0.000000	0.000000
565	0.005920	0.054222	0.000599	**755**	0.000000	0.000000	0.000000
570	0.015630	0.041319	0.000489	**760**	0.000000	0.000000	0.000000

	$\bar{r}$	$\bar{g}$	$\bar{b}$
сумма	1.000000	1.000000	1.000000

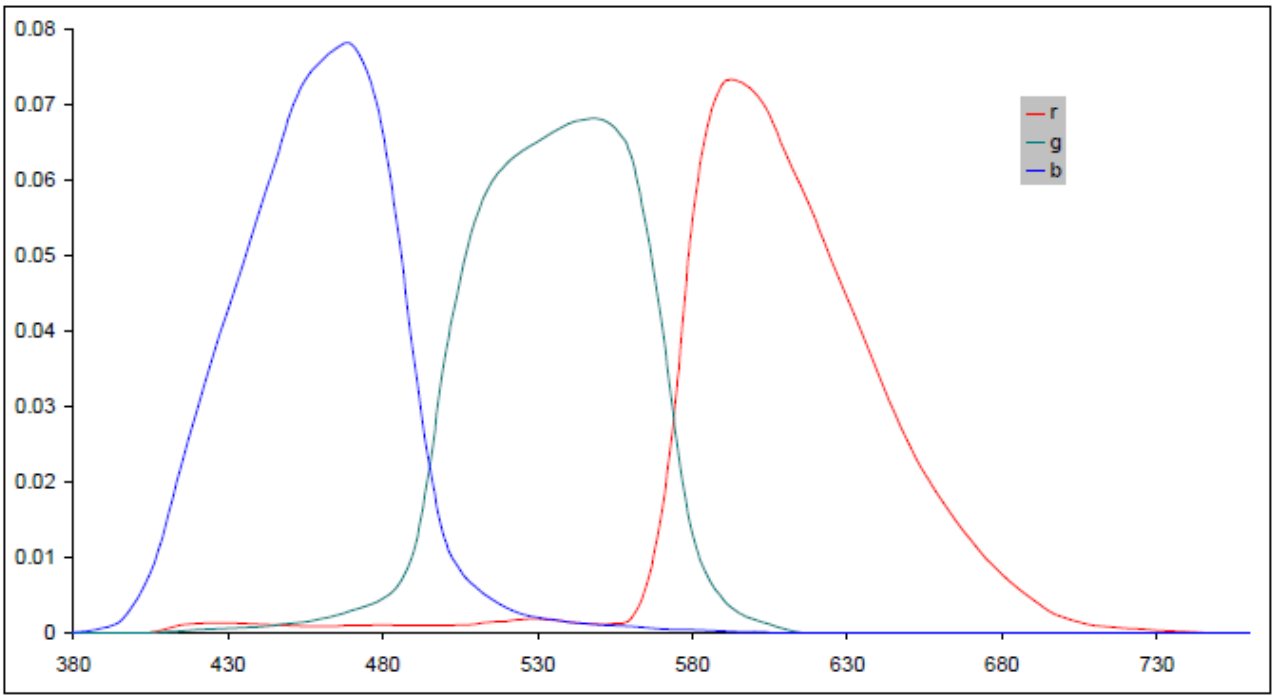

Рис. A5.1: Чувствительность стандартных камер EBU – 2012

Оптимизированная матрица

	R	G	B
R	1.182	-0.209	0.027
G	0.107	0.890	0.003
B	0.0040	-0.134	1.094

	R	G	B
сумма	1.1106	0.8894	1.0000